

Elias Klasila

Rakennusta stabiloivan kuiluanturan paaluvoimien määrittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

30.04.2013

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Elias Klasila Rakennusta stabiloivan kuiluanturan paaluvoimien määrittäminen 47 sivua + 2 liitettä 30.4.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennesuunnittelu
Ohjaaja(t)	Lehtori Jouni Kalliomäki DI Ilkka Uotila
<p>Tämän insinöörityön tavoitteena oli tuottaa Excel-sovellus rakennusta stabiloivan kuiluanturan tukipaalujen paaluvoimien määrittämiseen. Sovellus tuotettiin Finnmap Consulting Oy:lle.</p> <p>Rakennukseen kohdistuvat vaakavoimat, esimerkiksi tuulikuorma, viedään maaperään jäykistysjärjestelmien avulla. Toimisto- ja liikerakentamisessa käytetään yleensä mastokuilujäykistystä, sillä rakennuksen tilat halutaan pitää avoimina ja muunneltavuus on säilytettävä. Kun maaperän kantavuus on heikko, joudutaan käyttämään paalutusta, jotta stabiloivat voimat saadaan vietyä kantavaan maakerrokseen tai kallion pintaan.</p> <p>Jäykistävien kuilujen suuret stabiloivat voimat kasvattavat paalumääriä. Isojen paalutusten paaluvoimien laskeminen on työlästä ja käytettävät kaavat ovat monimutkaisia, niinpä yritykseen haluttiin helppokäyttöinen Excel-sovellus paaluvoimien määrittämiseen. Excel-sovelluksen avulla saadaan myös yhtenäistettyä paaluvoimalaskelmien ulkonäkö. Tavoitteena oli myös, että Excel-sovelluksella olisi voinut tutkia, voidaanko jäykistävä kuilu perustaa myös maanvaraisena. Lisäksi opinnäytetyössä tutkittiin, onko mahdollista saada linkkiä Excel-sovelluksesta Tekla Structures -tietomallinnusohjelmaan paalutuksen tietojen siirtämiseksi.</p> <p>Lopputuloksena syntyi Excel-sovellus paaluvoimien määrittämiseen. Sovellusta on helppo käyttää ja sen avulla yrityksen eri suunnittelijoiden tuottamien paaluvoimien laskentaraporttien ulkonäkö saadaan yhtenäisiksi. Sovellus ei tutki voidaanko kuilua perustaa maanvaraisena. Linkki Excel-sovelluksen ja Tekla Structures -ohjelman välillä on mahdollista tehdä, mutta tässä opinnäytetyössä sitä ei tuotettu ajan puutteen vuoksi.</p>	
Avainsanat	jäykistys, paalutus, paaluvoima

Author(s) Title Number of Pages Date	Elias Klasila Determining the pile forces for a stabilizing shaft's foundation base 47 pages + 2 appendices 30 April 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Jouni Kalliomäki, Senior Lecturer Ilkka Uotila, M.Sc.
<p>The aim of this bachelor's thesis was to create an Excel based program for the determining the pile forces for a shaft's foundation base stabilizing a building. The program was made for Finnmap Consulting Oy.</p> <p>Horizontal forces that affect a building, such as wind load, will be transferred into the soil using a stabilizing system. One of the most common ways to stabilize an office building is to use a stabilizing shaft because the open spaces and adaptability are to be kept intact. If the bearing capacity of the soil is poor, piling is necessary in order to take the forces safely to the bearing soil layer or rock.</p> <p>The great forces that need to be taken care of increase the amount of piles needed to accomplish the task. Calculating pile forces from big piling groups is laborious and formulas are complicated and that is why the company wanted an easy-to-use Excel application to help determining the pile forces. With the help of Excel application the company also harmonizes the appearance of the pile force calculations. One goal was also that the application would examine if the stabilizing shaft could be founded ground bearing. In this thesis, the possibility to create a link between the Excel application and Tekla Structures so that the information of the piling could be transferred between those programs was also studied.</p> <p>As a result an Excel application was created to determine the pile forces, it is easy to use and it harmonizes the appearance of the pile force calculations made by different engineers at Finnmap Consulting. The application does not examine whether the shaft could be founded on ground. The link between the Excel based program and Tekla Structures is possible to do but it was not done due to lack of time.</p>	
Keywords	stabilizing, piling, pile forces

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Rakennuksen jäykistäminen	2
2.1	Rajatilatarkastelut	3
2.1.1	Murtorajatila	3
2.1.2	Käyttörajatila	3
2.1.3	Asennusvaihe ja onnettomuustilanne	3
2.2	Jäykistys suunnittelun vaiheet	4
2.3	Toisen kertaluvun tarkastelut	6
2.4	Jäykistysjärjestelmät	6
2.4.1	Mastojäykistys	6
2.4.2	Kehäjäykistys	8
2.4.3	Levyjäykistys	9
2.4.4	Ristikkojäykistys	9
2.4.5	Yhdistelmäjäykistys	10
3	Paalutus	10
3.1	Paalutusluokat	11
3.1.1	Paalutusluokka III	11
3.1.2	Paalutusluokka II	11
3.1.3	Paalutusluokka I	12
3.2	Paalutyypit	12
3.2.1	Tukipaalut	13
3.2.2	Kitkapaalut	13
3.2.3	Koheesiopaalut	14
3.2.4	Välimuotopaalut	14
3.3	Paaluperustuksiin vaikuttavat ulkoiset kuormitukset	14
3.3.1	Pystykuormitus	15
3.3.2	Vaaka- ja momenttikuormitus	15
3.3.3	Sivukuormitus	16
3.3.4	Negatiivinen vaippahankaus	16
3.4	Paalutuksen suunnittelu	16
3.4.1	Paalujen sijoittelu	17
3.4.2	Sallitut mitta- ja sijaintipoikkeamat	19

4	Paaluvoimien määrittäminen	20
4.1	Geometrialtaan yksinkertaisten tukipaalutusten laskenta	20
4.1.1	Pystysuorat tukipaalut	21
4.1.2	Tasotapaus, missä paaluja on kahdessa eri suunnassa	25
4.1.3	Staattisesti määrätyt paalutukset	30
4.2	Tukipaalutuksen paaluvoimien selvittäminen siirtymämenetelmällä	32
4.2.1	Tasotapaus	33
4.2.2	Pääjäykkyydet ja pääsuunta	37
4.2.3	Paaluvoimien ratkaisu avaruustapauksessa	40
5	Excel-sovellus	42
5.1	Lähtötietojen syöttäminen	42
5.1.1	Anturan lähtötiedot	43
5.1.2	Kuormitus	43
5.1.3	Paalutus	44
5.2	Tulosten lukeminen	45
5.3	Laskentaraaportti	45
6	Yhteenveto	46
	Lähteet	47
	Liitteet	
	Liite 1. Excel-sovelluksen laskentaraaportti, hissikuilun paaluanturan paaluvoimat	
	Liite 2. Alkuperäislaskelmat hissikuilun paaluanturan paaluvoimista	

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa Excel-sovellus rakennusta stabiloivan kuiluanturan tukipaalujen paaluvoimien määrittämiseen. Excel-sovellus tuotetaan Finnmap Consulting Oy:n N-sektorille. Finnmap Consulting Oy on rakennetekniikkaan erikoistunut suunnittelu- ja konsultointiyritys, joka tavoittelee vahvaa markkina-asemaa keskitymällä rakennetun ympäristön suunnittelu-, konsultointi- ja kehitystehtäviin. Finnmap Consulting Oy:n pääkonttori on Helsingissä ja yrityksellä on toimintaa ympäri Suomen. Finnmap Consulting Oy muodostaa tytäryhtiöidensä kanssa FMC Group -nimisen konsernin, joka on osa Sweco-konsernia. Sweco on kansainvälisesti toimiva tekninen asiantuntijayhtiö, joka tarjoaa konsulttipalveluja maailmanlaajuisesti noin 80 eri maassa. Henkilöstöä Swecolla on 7800 ja liikevaihto on noin 890 miljoonaa euroa.

Rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat, esimerkiksi tuulesta ja rakenteiden vinoudesta johtuvat, otetaan vastaan jäykistysjärjestelmän avulla. Jäykistysjärjestelmien tehtävänä on viedä kuormat anturan kautta maapohjaan. Mikäli maapohjan kantavuus on heikko, joudutaan kuormia viemään kantaviin kerroksiin paalutuksen avulla. Monet toimisto- ja liikerakennukset jäykistetään eli stabiloidaan jäykistyskuilujen avulla, sillä niihin ei haluta massiivisia väliseiniä rajoittamaan tiloja ja niiden muunneltavuutta. Finnmap Consulting Oy:llä ei ole ollut käytössä riittävän yksinkertaista sovellusta, jolla olisi voinut selvittää jäykistyskuilun anturan paalutuksen paaluvoimia, minkä takia niiden määrittäminen on ollut työlästä.

Rakennusta stabiloivan kuiluanturan määrittämiseen tehdyllä sovelluksella säästetään työtunteja ja pienennetään virheiden mahdollisuuksia. Lisäksi sovellus yhtenäistää paalulaskelmien raportointia ja siten toteuttaa myös yrityksen laatujärjestelmään asetettua tavoitetta laskelmaraporttien yhtenäisyydestä. Excel-sovelluksella tulee pystyä laskemaan suuren paalutuksen paaluvoimat siten, että paalutuksen sijainti voidaan suunnitella mahdollisimman vapaasti ja myös vinopaaluja voidaan käyttää. Sovelluksella tulisi myös voida tarkistaa, olisiko mahdollista perustaa mastokuilu maanvaraisella anturalla. Opinnäytetyössä myös tutkitaan, onko mahdollista linkittää Excel-sovelluksesta saatavia tietoja Tekla Structures -mallinnusohjelmaan.

2 Rakennuksen jäykistäminen

Jäykistysjärjestelmän tehtävänä on ottaa vastaan vaakakuormat ja viedä niiden aiheuttamat rasitukset perustusten kautta maaperään. Yleisimmin vaakasuuntaisia rasituksia aiheutuu muun muassa tuulikuormista, maanpaineesta ja rakenteiden vinoudesta ja epäkeskisyydestä. Muita vaakasuuntaisia rasituksia voi aiheutua esimerkiksi kutistumasta ja virumasta, jännevoimista, nosturikuormista ja törmäys- ja jarrukuormista. Vaakasuuntaisista kuormista aiheutuu perustuksille pysty- ja vaakakuormia sekä käytetystä jäykistysjärjestelmästä riippuen myös momenttikuormitusta. Rakennuksen jäykistysjärjestelminä käytetään yleensä masto-, kehä-, levy- tai ristikkojäykistystä tai useiden jäykistystapojen yhdistelmää, joiden tarkempaa toimintaa selitetään myöhemmin. Kaikki jäykistysjärjestelmät toimivat siten, että tasorakenteet mitoitetaan ottamaan vastaan vaakakuormitukset ja tasorakenteet vievät vaakakuormat edelleen jäykistysjärjestelmän pystyrakenteille, jotka vievät kuormitukset maaperään. Jotta jäykistysjärjestelmä toimii, pitää vaakasuuntaisen tason lisäksi jäykistysjärjestelmässä olla vähintään kolme pystysuuntaista rakenneosaa. Pystysuuntaiset rakenneosat ja niiden voimien vaikutusviivat eivät saa leikata samassa pisteessä eivätkä ne saa olla yhdensuuntaisia. Lisäksi sen eri osien kapasiteetti ei saa ylittyä missään kuormitustapauksessa ja rakennuksen tulee pysyä tarpeeksi jäykkänä. Toisin sanoen rakennuksen käytölle haitallisia muodonmuutoksia ja siirtymiä ei saa muodostua. Lisäksi rakennuksen kaatuminen on estettävä.

Rakennuksen jäykistys voidaan tarkastella melko luotettavasti erilaisilla FEM-ohjelmilla. Niitä käytettäessä on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota rakennuksen mallinnukseen ja rakenneosien mittojen ja ominaisuuksien sekä rakennusosien liitosten on vastattava todellisuutta, jotta FEM-ohjelman tuloksista saataisiin todellisia. Erityisesti isoissa ja monimutkaisissa rakennuksissa virheet korostuvat, ja toisaalta oikein mallinnetun mallin tuloksista voidaan rasitusten jakautuminen ja kertyminen havaita paremmin kuin yksinkertaistettua mallia käyttäessä. [1, s. 2-4, 6, 9, 13; 3, s. 50.]

2.1 Rajatilatarkastelut

Rakennuksen tulee pysyä stabiilina kaikissa mahdollisissa vaiheissa elinkaarensa loppuun saakka. Jäykistävien rakenteiden toiminta tulee tarkastella murto- ja käyttörajatilassa sekä asennusvaihe ja onnettomuustilanne on tutkittava erikseen.

2.1.1 Murtorajatila

Ihmisten turvallisuuteen ja rakenteiden varmuuteen liittyvät rajatilat luokitellaan murto-rajatiloiksi, kuten myös aineen tai tavaran suojaaminen joissain tapauksissa. Jäykistysrakenteissa tulee tarkastella jäykän kappaleen tai sen osan tasapainon menetys, materiaalmurto, siirtymät, rakenteen tai sen osan muuttuminen mekanismiksi tai sen stabiiliuden menetys ja ajasta riippuva vaurioituminen, esimerkiksi väsyminen. [1, s. 6.]

2.1.2 Käyttörajatila

Rakenteen toimintaan normaalikäytössä, ihmisten mukavuuteen ja rakennuskohteen ulkonäköön liittyvät rajatilat ovat käyttörajatiloja. Käyttörajatiloissa yleensä tarkastellaan jännitykset, halkeamaleveydet ja taipumat. Kriteereinä on, että rakenteeseen ei saa syntyä siirtymiä, värähtelyjä eikä vaurioita, jotka vaikuttavat ulkonäköön, käyttäjien mukavuuteen tai rakenteen toimivuuteen. Erityisesti korkeissa rakennuksissa ja joissakin jäykistystyypeissä saattavat siirtymät ja värähtelyt olla mitoittavia tekijöitä. Eurokoodeista ei löydy suoraan käytettäviä raja-arvoja vaan rakenteen kelpoisuus arvioidaan tapauskohtaisesti. Suomessa on käytetty taipuman ylärajana arvoa $H/400$ - $H/1000$, jossa H on rakennuksen korkeus. [1, s. 7.]

2.1.3 Asennusvaihe ja onnettomuustilanne

Asennusaikainen jäykistys on tutkittava jokaisessa tilanteessa ja väliaikaistuennan tarve on selvitettävä. Jäykistys suunnitellaan siten, että ylimääräisiä asennusaikaisia tuentoja ei tarvitsisi tehdä. Jäykistysjärjestelmä ja jäykistävät rakenteet saattavat olla erilaiset asennuksen aikana kuin rakennuksen valmistuttua, ja joillekin rakennusosille voi asennusaikana tulla sellaisia rasituksia, joita ei lopputilanteessa ole. Asennusaikaisina jäykisteinä voidaan helposti käyttää pulttiliitoksilla kiinnitettyä ristikkojäykistettä, jotka ovat helposti purettavissa. Rakennesuunnittelijan tehtävä on antaa elementtien asen-

nussuunnitelmaa varten tiedot elementtien asennusjärjestyksestä, väliaikaisesta tuenasta ja lopullisesta kiinnittämisestä niin, että rakenne säilyy stabiilina kaikissa asennustyön vaiheissa.

Onnettomuustilanteissa yksittäisen rakenneosan murtumisen seurauksena aiheutuva rakenteiden jatkuva sortuma ja etenevä vaurioituminen on pyrittävä estämään. Jäykistysrakenteiden toiminta tulee suunnitella siten, että jäykistysrakenteen osan sortuessa muiden jäljelle jäävien rakenteiden on pystyttävä varmistamaan rakennuksen stabiilius. [1, s. 8, 23.]

2.2 Jäykistysuunnittelun vaiheet

Jäykistystä suunniteltaessa aluksi valitaan sopiva jäykistystapa, minkä jälkeen tehdään alustava jäykistysuunnittelu. Alustavassa jäykistysuunnittelussa arvioidaan, onko rakennus riittävän jäykkä ja aiheuttavatko vaakakuormat rakennukselle kiertymiä, joista tulee lisärasituksia jäykistysjärjestelmälle. On myös tarkistettava, tuleeko jäykistävälle rakenteille tarpeeksi pystykuormaa, jotta jäykistysjärjestelmää ei jouduta missään kuormitustapauksessa ankkuroimaan. Erityisesti paalutettavissa kohteissa ankkuroinnin järjestäminen on hankalaa. Alustavassa suunnittelussa rakennuksen jäykkyyttä voidaan tutkia kaavalla 1:

$$\sum EI \geq \frac{q^* \cdot h^3}{8} + \frac{P \cdot h^2}{3} \quad (1)$$

q^* on $B \cdot q$

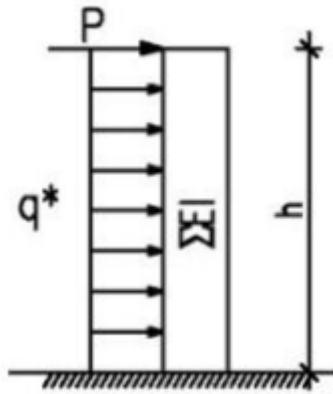
h on rakennuksen korkeus [m]

P on pistekuorma rakennuksen yläreunassa käyttörajatilassa [kN]

B on rakennuksen leveys laskentasuuntaa vasten kohtisuorassa [m]

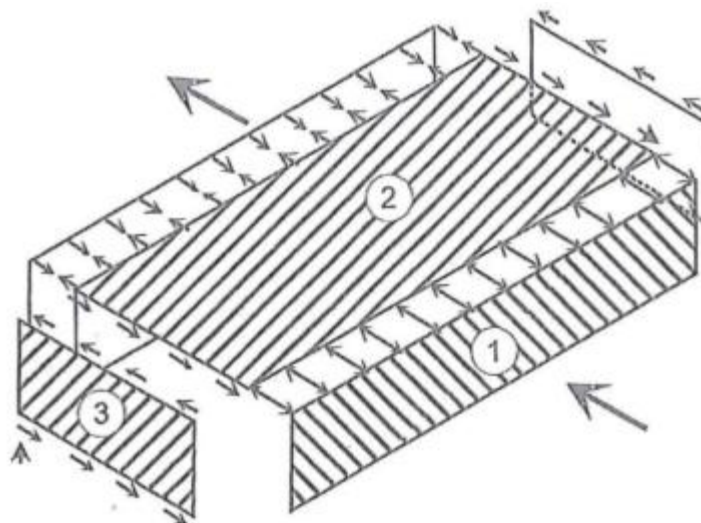
q on rakennuksen vaakakuorma käyttörajatilassa, sisältäen tuulen ja lisävaakavoiman [kN/m²]

$\sum EI$ on tarkasteltavassa suunnassa toimivien jäykistysrakenteiden taivutusjäykkyyksien summa [MN/m²]



Kuva 1. Merkinnot alustavaan jäykistyslaskentaan [1, s. 6].

Alustavan jäykistys suunnittelun jälkeen suunnitellaan rakennuksen rakennusaikainen jäykistys, jonka jälkeen tarkastellaan käyttötilanteen jäykistys suunnittelu. Viimeisenä tehtävänä on vielä tutkia jäykistysjärjestelmän toiminta onnettomuustilanteessa. Kuvas-
vassa 2 on esitetty yksikerroksisen levyjäykisteisen rakennuksen käyttötilanteen mitoi-
tuksen vaiheita. Puolet sivuseinään (numero 1) vaikuttavasta tuulikuormasta viedään
perustuksille ja puolet tuulikuormasta sekä koko kattoon vaikuttava kuorma viedään
tasorakenteille (2), jotka mitoitetaan toimimaan jäykistysrakenteen osana. Tasojen teh-
tävänä on siirtää vaakakuormat edelleen jäykistäville pystyrakenteille (3), minkä takia
tasojen tulee toimia monoliittisena jäykkänä levynä. Esimerkiksi ontelolaatasto jäykiste-
tään saumaraudoituksen ja saumavalun avulla. Tasojen mitoituksen jälkeen viedään
vaakavoimat tasorakenteilta pystyrakenteille ja pystyrakenteilta edelleen perustuksiin.
Lopuksi mitoitetaan itse elementit ja niiden liitokset. [1, s. 9; 3, s. 11-12.]



Kuva 2. Jäykistys suunnittelun eteneminen, levyjäykisteinen rakennus [3, s. 11].

2.3 Toisen kertaluvun tarkastelut

Rakennuksen kokonaisvakavuutta laskiessa on toisen kertaluvun rasituksilla vaikutusta rakennuksissa, joissa jäykistävät rakenteet ovat hoikkia rakennuksen korkeuteen nähden, kuten esimerkiksi korkeissa rakennuksissa. Tällöin jäykistysrakenteiden mitoituksessa on selvitettävä ja otettava huomioon toisen kertaluvun taipumat. Vaikutukset huomioidaan kasvattamalla rakenteeseen vaikuttavia vaakavoimia. SFS-EN 1992-1-1 mukaan toisen kertaluvun vaikutukset voidaan jättää huomiotta, jos ne ovat alle 10 % vastaavista ensimmäisen kertaluvun vaikutuksista. [1, s. 10-11; 2, s. 64.]

2.4 Jäykistysjärjestelmät

Rakennuksen jäykistämiseen on olemassa monia tapoja. Sopivimman jäykistysjärjestelmän valintaan vaikuttaa esimerkiksi rakennuksen runko, mittasuhteet, arkkitehtuuri ja käyttötarkoitus. Myös rakennuksen muunneltavuus ja muuntojoustavuus vaikuttaa jäykistystavan valintaan. [1, s. 13.]

2.4.1 Mastojäykistys

Jäykistysrakenteet toimivat alapäästään jäykästi kiinnitettyinä ulokepalkkeina mastojäykistyksessä. Vaakakuormien aiheuttamat rasitukset siirtyvät mastojäykisteisessä rakennuksessa pystyrakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa. Mastojäykisteisessä rakennuksessa rungon muut pystyrakenteet voidaan toteuttaa taloudellisesti ja aikataullisesti tehokkailla nivelliitoksilla. Mastojäykisteinä voivat toimia mastopilarit, mastoseinät tai mastokuilut. [1, s. 13.]

Jäykistys mastopilareilla

Mastopilarit ovat jäykästi alapäästään kiinnitettyjä ulokkeita, jotka ottavat vaakakuormia vastaan. Ulkoseinärakenteet ja jäykät tasorakenteet vievät vaakakuormat pilareille. Mastopilarijäykistys toimii hyvin matalissa, alle nelikerroksisissa rakennuksissa. Korkeammissa rakennuksissa pilarien vaadittavat poikkileikkausmitat kasvavat niin suuriksi, ja taipumien hallinta tulee haastavammaksi, joten niitä ei ole kannattavaa käyttää. Mastopilarijäykistys on yksinkertainen suunnitella ja asentaa, ja se mahdollistaa suuret yhtenäiset lattiapinnat. Suurten yhtenäisten lattiapintojen takia se mahdollistaa rakennuk-

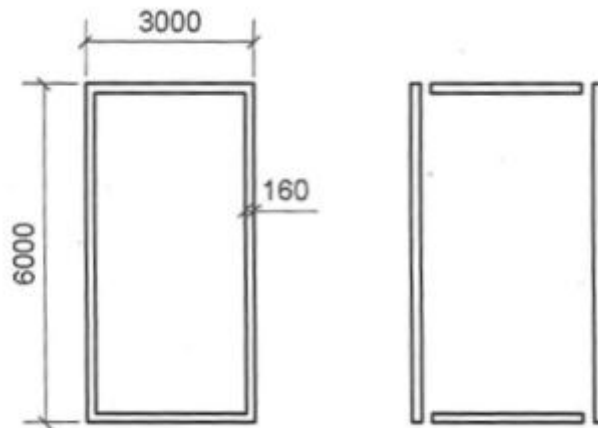
sen muuntojoustavuuden ja sopii hyvin toimisto-, liike- ja teollisuusrakennuksiin. Toisaalta pilarikoko ja raudoit määrä pilareissa on suurempi kuin seinäjäykistetyissä rakenteissa sekä perusanturat ovat jäykän kiinnityksen välittämän momentin kautta suurempia kuin muita jäykistysjärjestelmiä käyttäessä. [1, s. 14.]

Jäykistys mastoseinillä

Myös mastoseinät toimivat jäykästi alapäästään kiinnitettyinä ulokepalkkeina. Seinä-mastot voidaan koota yhtenäisenä rakenteena toimivista seinäelementeistä. Mastoseinille on tärkeää saada riittävästi pystykuormaa, jotta seinä olisi kauttaaltaan puristettu jokaisessa kuormitustapauksessa. Mastoseinät on ankkuroitava maaperään saakka, jos niihin kohdistuu vetoa. Koska vaakarasitukset siirtyvät tasoilta mastoseinille jäykkyyksien suhteessa, on tärkeää laskea seinien jäykkyydet kaikki aukot huomioiden. Mastoseinät pyritään sijoittamaan rakennukseen mahdollisimman symmetrisesti, jotta vaakakuormat eivät pääsisi aiheuttamaan kiertymän kautta lisärasituksia mastoseinille. Mastoseinät ovat huomattavasti jäykempiä rakenneosia kuin mastopilarit, joten ne soveltuvat myös korkeisiin rakennuksiin. Mastoseinillä jäykistäminen on tehokas jäykistysjärjestelmä; seinien määrä voidaan pitää pienenä ja suuresta jäykkyydestä johtuen muodonmuutokset pysyvät pieninä. Toisaalta jäykistysseinien pieni määrä johtaa siihen, että vaakavoimia siirtävät liitokset seinien ja tasojen välillä voivat olla hankalia toteuttaa, koska yksittäisten seinien vaakavoimat saattavat kasvaa suuriksi. Lisäksi jäykistysseinien aukot vaativat isompia raudoitusmääriä kuin ei-jäykistävien seinien aukot. [1, s. 15-17.]

Jäykistys mastokuiluilla

Mastokuilut toimivat samaan tapaan kuin mastoseinät, niiden jäykkyys on vain huomattavasti suurempi.



Kuva 3. Mastokuilun ja vastaavien mastoseinien vertailu [1, s.17].

$$I_{x,torni} = \frac{3 \cdot 6^3}{12} - \frac{(2,68) \cdot (5,68)^3}{12} = 13,07 \text{ m}^4 \quad (2)$$

$$I_{x,seinät} = 2 \cdot \frac{0,16 \cdot 6^3}{12} = 5,76 \text{ m}^4 \quad (3)$$

Kuvassa 3 esitetyn mastokuilun jäykkyys on laskettu kaavassa 2 ja vastaavien mastoseinien yhteenlaskettu jäykkyys kaavassa 3. Vastaavien mastoseinien jäykkyys on siis vain 44% mastokuilun jäykkyydestä. Mastokuiluja käytettäessä on tärkeää mitoittaa tornien eri seinien liitokset siten, että rakenteet toimivat monoliittisesti yhdessä. Mastokuilujen suuren jäykkyyden ansiosta vaakasuuntaisia siirtymiä saadaan rajoitettua sallittuihin arvoihin. Esimerkiksi hissi- ja IV-kuilut voidaan mitoittaa toimimaan jäykistävänä rakenteena. Mastokuilut vaativat alleen suuret anturat, ja jos perustukset joudutaan paaluttamaan, on suurien anturoiden alle tulevan paalutuksen paaluvoimien määrittäminen hankalaa. Tämän ongelman hallitsemiseen on tuotettu työkalu tässä opinnäytetyössä. [1, s. 17-18.]

2.4.2 Kehäjäykistys

Kehäjäykistyksessä nivelellisesti tai jäykästi perustuksiin kiinnitetyt pilarit ottavat vaakarasitukset vastaan kehinä, joiden nurkat saavat vaakakuormien rasitukset pilarien ja palkkien taivutusrasituksena. Kehien nurkat toimivat jäykkinä tai osittain jäykkinä liitoksina, minkä takia kehäjäykistyksen toteuttaminen elementtitekniikalla on hankalampaa kuin paikallavaletuissa rakennuksissa. Kehäjäykistystä käytetään tavallisesti matalissa yksikerroksisissa rakennuksissa, mutta se sopii myös useampikerroksisiin rakennuk-

siin. Kehärakenteissa suurimmat momentit esiintyvät yleensä nurkissa, minkä takia asennusliitosten toteutus on haastavaa ja jos kehän nurkkien käyttöaste on korkea, voi vaakasiirtymien hallinnasta tulla hankalaa. Rakenneosien mitat ovat kehäjäykisteisessä rakennuksessa suuremmat erillisten jäykistävien rakenneosien käyttöön verrattuna, mutta suunnitteleamalla palkit jatkuviksi palkeiksi, voidaan niiden korkeutta madaltaa verrattuna vapaasti tuettuihin palkkeihin, samalla jatkuvan sortuman estäminen onnettomuustilanteessa on helpommin suunniteltavissa. Kehäjäykistystä käytettäessä rakennuksen runkoon ei tarvitse lisätä ylimääräisiä jäykistysrakenteita rajoittamaan tilojen käyttöä ja muunneltavuutta, lisäksi pilarin alapään liitokset perustuksiin voidaan suunnitella nivelellisiksi, minkä takia perustusten koko saadaan pienemmäksi verrattuna mastojäykisteiseen rakennukseen. [1, s. 18-19; 4, s. 119.]

2.4.3 Levyjäykistys

Levyjäykistyksessä rakenne jäykistetään rungon aukkoihin sijoitetuilla levyillä. Levyrakenteet vievät vaakarasitukset leikkausvoimina rakenteille ja perustuksiin. Jäykistävien levyjen sijoitus kerroksissa on vapaata, mutta mikäli levyrakenteet eivät sijaitse kerroksissa päällekkäin, joudutaan jäykisteiden siirtämiä vaakasuuntaisia leikkausvoimia viemään tasossa ja jäykistyksestä aiheutuvat pystykuormat on muistettava siirtää muilla rakenteilla perustusten kautta maaperään. Etenkin vaakasuuntaisten leikkausvoimien vieminen jäykisteeltä toiselle tasossa saattaa aiheuttaa vaikeita liitosratkaisuja. Koska jäykistävien rakenteiden määrä on yleensä suuri ja rakenne on jäykkä, jäävät siirtymät yleensä pieniksi eikä perustusten koko kasva jäykistysvuoksi. Elementtirakenteisen asuinrakennusten kantavat ja jäykistävät ulkoseinät on levyjäykistys erikoistapaus, jossa rakenne toimii samalla tavalla kuin mastoseinjäykistyksessä ja se voidaan myös mitoittaa mastoseinjäykisteenä. [1, s. 20.]

2.4.4 Ristikojäykistys

Ristikojäykistys toimii levyjäykisteiden kaltaisesti, siinä levyjäykisteet on korvattu veto- ja/tai puristussauvoilla ja yleensä ristikojäykistys sopii samankaltaisiin rakennuksiin kuin levyjäykistys. Jäykistysristikot voidaan suunnitella joko osaksi pystykuormaa kantavaa rakennetta tai kokonaan erillisenä osana. Jos jäykistysristikko toimii osana pystykuormia kantavaa rakennetta, voi ristikon paarteina toimia pilarit tai seinät ja ristikon diagonaalit ovat erillisiä jäykistysristikon osia. Jäykistysristikon mitoituksessa on otetta-

va huomioon kantavista rakenteista ristikon sauvoille tulevat lisäkuormitukset, esimerkiksi vaakarakenteiden painumista tai betonipilarien kutistumisesta aiheutuvat. Jos diagonaalisauvat suunnitellaan toimimaan vedettyinä sauvoina, on ne helpompi mitoittaa, mutta yleensä kyseiset ratkaisut haittaavat tilankäyttöä enemmän kuin muuten sijoitetut puristetut sauvat. Jäykistysristikon jäykkyys on sitä parempi, mitä suurempi niiden rakennekorkeus on, ja siten niiden aiheuttamat rasitukset muille runkorakenteille ovat pienemmät. Kokonaan erillisenä osana toimivat jäykistysristikot sijoitetaan yleensä rakenteen ulkopuolelle ja niille siirretään vain vähän pystykuormia, jonka takia erillisenä rakenteena toimivat jäykistysristikot joudutaan ankkuroimaan maaperään. Ristikot toimivat hyvin asennusaikaisina jäykisteinä, jos lopullinen jäykistysjärjestelmä ei vielä toimi tai asennusjärjestyksestä johtuen tarvitaan väliaikaista jäykistystä. [1, s. 21-23; 4, s.120.]

2.4.5 Yhdistelmäjäykistys

Mahdollisimman edullisen ratkaisun saavuttamiseksi voi olla kannattavaa soveltaa edellä mainittujen jäykistysjärjestelmien yhdistelmiä. Yleisimpiä yhdistelmiä on levyjäykistetty rakennuksen alaosa ja mastopilarijäykistetty ylin kerros tai mastoseinä tai mastokuilu jäykistys yhdistettynä jäykistävään ristikkorakenteeseen. Yhdistelmäjäykistystä käytettäessä on erityisen tärkeää huomioida erilaisten jäykistysjärjestelmien erilaiset jäykkyydet ja vaakakuormien jakaminen eri jäykisteille on tehtävä oikein. Erilaisten jäykistysjärjestelmien jäykkyydet voidaan melko luotettavasti selvittää FEM-ohjelmistoilla. [1, s. 23-24.]

3 Paalutus

Paalutuksen tehtävänä on viedä rakennuksen kuormat kantavaan maaperään tai kalliioon. Paaluperustuksia käytetään, kun maaperän kantavuus on huono tai kun maaperän kantava kerros on niin syvällä, että perustaminen perusmuureilla tai anturoilla on kallista ja hankalaa. Paalutuksen käyttö on yleistynyt, sillä varsinkin Etelä- ja Lounais-Suomessa on alettu rakentaa rakennuksia maa-alueille, joissa paalutus onärkevin perustamistapa. [5, s. 43.]

3.1 Paalutusluokat

Paalutus jaetaan kolmeen paalutusluokkaan, III, II ja I, joista paalutusluokkaa III käytetään helppoissa ja paalutusluokkaa I vaativissa kohteissa. Luokkaa määritettäessä otetaan huomioon rakennuskohteen luonne, pohjatutkimusten tarkkuus, paalujen ominaisuudet ja paalutuskaluston ja paalutustöiden suorituksen sekä valvonnan seikkaperäisyys ja laatu. Paalutusohjeissa määrätään kullekin paalutusluokalle esimerkiksi minkälaisia jatkoksia paaluissa voi käyttää ja asetetaan vaatimuksia kallioikärkien ja paalun vähimmäisteräsalan määrittämiseen. Seuraavissa kappaleissa on esitetty esimerkkejä kullekin paalutusluokalle. Tarkemmat määrytykset annetaan Suomen Rakennusinsinööriliitto ry:n (RIL) julkaisemasta lyöntipaalutusohjeessa LPO-2005. Teräksisille lyönti-, pora- ja puristuspaaluille RIL on julkaissut omat ohjeet: Pienpaalutusohje PPO-2007. [8, s. 43-46; 9.]

3.1.1 Paalutusluokka III

Paalutusluokkaa III käytetään, kun paalutuskohde ja paaluille tulevat kuormat ovat pieniä ja/tai paalutustyön suoritus ei täytä paalutusluokka II:ssa annettuja vaatimuksia. Lisäksi paalutusluokkaan III luetaan paalutustyöt, joiden työkohteen olosuhteet sekä paalujen valmistus ja asennus voidaan määritellä muun muassa seuraavalla tavalla:

- Suunnitelma perustuu luotettaviin, mutta yleispiirteisiin pohjatutkimuksiin.
- Teräsbetonipaalun nimellislukuus on vähintään C35/45.

[8, s. 44.]

3.1.2 Paalutusluokka II

Paalutusluokkaan II luetaan paalutustyöt, joiden työkohteen olosuhteet sekä paalujen valmistus ja asennus määritellään siten, että paalutusluokan III vaatimusten lisäksi paalutusluokalle II asetetaan seuraavat vaatimukset:

- Suunnitelma perustuu riittävän yksityiskohtaisiin ja luotettaviin pohjatutkimuksiin.
- Apupaalun käyttö on sallittua vain tapauskohtaisen harkinnan perusteella ja suunnitelmassa esitettyinä.

- Paalutustyöstä pidetään niin tarkkaa pöytäkirjaa, että sen perusteella voidaan arvioida, onko jokainen paalu säilynyt ehjänä ja paljonko paalu kantaa.
- Kallioon tai lohcareiseen maahan ulottuvat paalut varustetaan kalliokärjillä.

[8, s. 44-45.]

3.1.3 Paalutusluokka I

Paalutusluokka I jaetaan alaryhmiin IB ja IA paalujen sallitun geoteknisen kantavuuden ja paalutuksen tarkastustoimenpiteiden perusteella. Paalutusluokkien II ja III vaatimusten lisäksi paalutusluokalle IB asetetaan seuraavat vaatimukset:

- Teräsbetonipaaluissa käytettävän betonin nimellisluku on vähintään C40/50.
- Paalun pää on vahvistettu teräsvanteella.
- Paalutustyössä käytettävä järkäle on hydraulisesti toimiva.
- Apupaalun toimivuus ja loppulyöntiehto varmistetaan PDA-mittauksella.

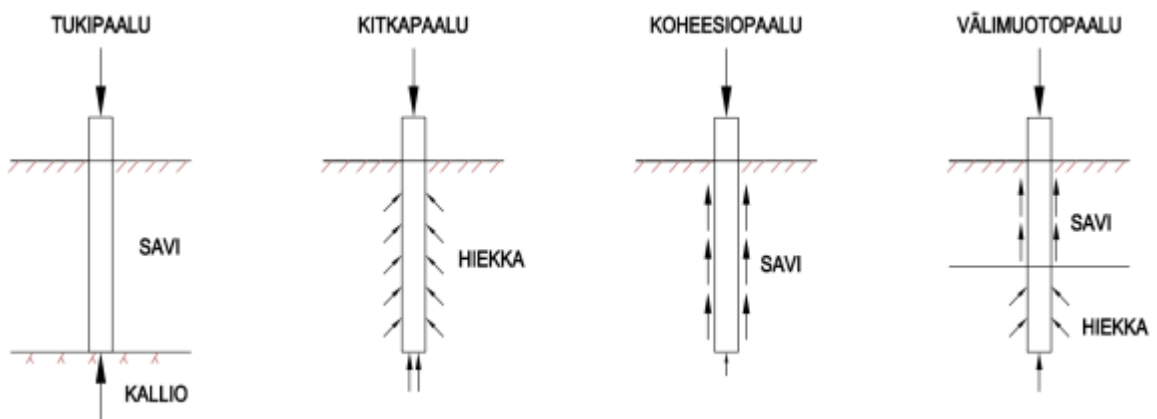
Paalutusluokka IA on paalutustöiden erityisluokka, jossa paalutuksen vaatimukset harvitaan kussakin tapauksessa erikseen. Paalutus voidaan suunnitella paalutusluokkaan IA vain, jos geoteknisellä suunnittelijalla ja pohjarakenteiden vastaavalla suunnittelijalla on AA-luokan pätevyys. [8, s. 45-46.]

3.2 Paalutyypit

Paalut voidaan jakaa erilaisiin tyyppeihin esimerkiksi paalujen materiaalin tai toimintatavan perusteella. Paalumateriaalin mukaisia paalutyyppejä ovat puupaalut, teräsbetonipaalut ja teräspaalut. Puupaaluja voidaan käyttää, kun paalu sijoittuu kokonaan pohjaveden alapuolelle ja sen lisäksi niiden yläpää on lahosuojattava, sillä pohjavedenpinta voi vaihdella vuosien kuluessa. Teräsbetonipaalut valmistetaan lähes aina tehtaissa ja ne ovat ns. normaalipaaluja, eli ne on mitoitettu nostoa, kuljetusta ja lyöntirasituksia varten. Jos perustusten paaluihin kohdistuu taivutusta, leikkausvoimaa tai vääntöä, joudutaan paalut mitoittamaan erikseen. Teräsbetonipaalut ovat poikkileikkaukseltaan neliön mallisia sivupituuden ollessa 200, 250 tai 300 mm. Teräspaaluina käyt-

tetään yleensä pyöreitä teräsprofileja, niitä käytettäessä tulee ottaa huomioon maan olosuhteet siten, että esimerkiksi korroosio ei vaurioita paalua niin paljon, että paalun kantavuus heikkenisi. [5, s. 45-48.]

Toimintatavan perusteella paalut voidaan jakaa neljään tyyppiin: tukipaaluihin, kitkapaaluihin, koheesiopaaluihin ja näiden välimuotoon. Paalutyypin toimintaperiaatetta on esitetty kuvassa 4. Excel-sovelluksella paaluvoimat lasketaan tukipaaluille, sillä kitka-, koheesio- ja välimuotopaalujen kantavuuden laskenta on epätarkkaa.



Kuva 4. Eri paalutyypin toimintaperiaate [5, s. 44].

3.2.1 Tukipaalut

Tukipaalun pää tukeutuu kiinteään pohjaan tai kallioon, ja perustuksilta paaluille tulevat kuormat välittyvät kantavaan maaperään pääasiassa paalun kärjen kautta. Koska paalun toimintatapa on helposti ymmärrettävissä ja toimintakelpoisuus on useimmiten yksiselitteisesti todettavissa, tulee paaluperustusten suunnittelussa ensisijaisesti selvittää tukipaalujen käyttömahdollisuus. Käytettäessä tukipaaluja on pohjatutkimuksissa selvítettävä kantavan maakerroksen tai kallion pinnan sijainti ja muodot. Lisäksi on selvítettävä läpäistävien maa- ja pohjakerrosten pääpiirteittäinen rakenne. [8, s. 20, 25, 42-43.]

3.2.2 Kitkapaalut

Kitkapaaluissa paalukuormat välittyvät pääosin paalun vaippapinnan ja maan välisen kitkan avulla ympäröivään maaperään ja myös paalun kärkituennalla siirtyä hieman paalukuormia maahan. Kitkapaalujen käyttö on järkevää, kun tiivisrakenteisen pohjakerroksen tai kallion päällä oleva karkearakeinen maa- tai moreenikerros on löyhä ja

paksu. Kitkapaaluja käytettäessä on selvitettävä maakerrosten väliset rajat ja maakerrosten ominaisuudet sekä paaluilla läpäistävien kerrosten että toimivaksi suunnitellun maakerroksen osalta. Kitkapaalujen kantavuuden määrittäminen riippuu paalua ympäröivien maakerrosten rakenteellisesta tiiveydestä ja paalun kantavuuden määrittäminen laskemalla on siksi epätarkkaa. Jos suunnittelun perustaksi ei ole käytettävissä samankaltaisissa pohjaolosuhteissa suoritettujen koepaalutusten ja paalujen koekuormitusten tuloksia, on suoritettava luotettavia paalujen kantavuusmäärittämiä etenkin vaativissa kohteissa. [8, s. 16, 26, 43; 11, s. 237-238.]

3.2.3 Koheesiopaalut

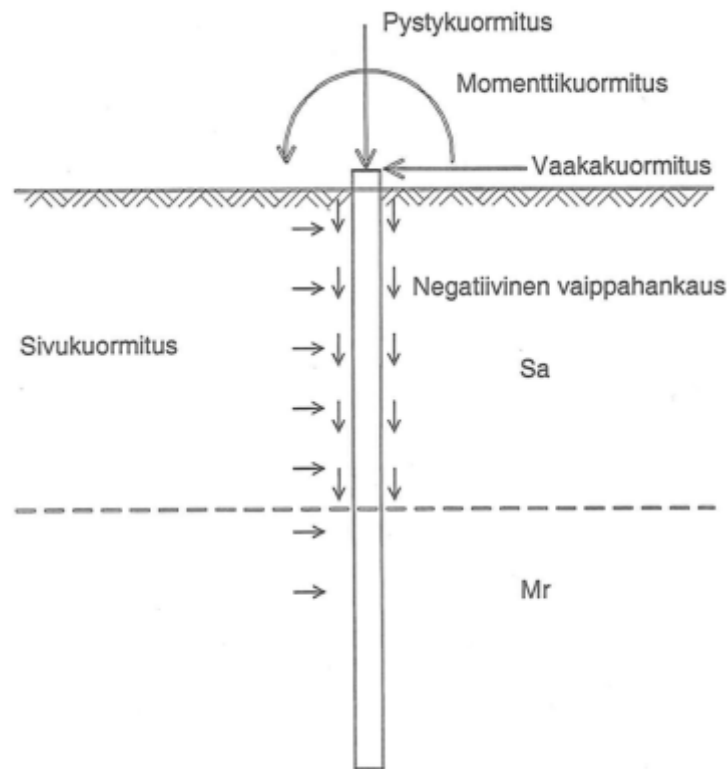
Koheesiopaalut siirtävät kuorman maakerrokseen vaippapinnalla vaikuttavan adheesion, kahden eri aineen välisen vetovoiman, avulla. Koska koheesiopaalut kuormittavat kokoonpuristuvia maakerroksia, tapahtuu koheesiopaalujen varaan perustetussa rakennuksessa useimmiten painumia. Sen takia koheesiopaaluja voidaan parhaiten käyttää työnaikaisissa ja lyhytaikaisissa perustusrakenteissa, kun hienorakeinen maakerros on paksu. Koheesiopaaluja ei yleensä käytetä pysyvissä rakenteissa. Koheesiopaaluja käytettäessä on pohjatutkimuksissa selvitettävä rakennuspaikan yleisten pohjatutkimusolosuhteiden lisäksi erityisesti pehmeiden maakerrosten lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. Jotta koheesiopaalujen kantavuus ja painumat voidaan selvittää, tulee selvitykset tehdä koko pehmeän maakerrostuman paksuudelta. [8, s. 16, 27, 43.]

3.2.4 Välimuotopaalut

Paaluja kutsutaan välimuotopaaluksi silloin, kun sen toimintatapa on yhdistelmä tuki-, kitka- tai koheesiopaalun toimintatavoista [5, s. 43].

3.3 Paaluperustuksiin vaikuttavat ulkoiset kuormitukset

Yläpuolisilta rakenteilta paaluperustuksiin kohdistuu pysty- ja vaakasuuntaisia kuormia sekä momenttikuormitusta. Maaperästä paaluihin vaikuttaa sivukuormitus ja negatiivinen vaippahankaus. Paaluun vaikuttavat ulkoiset kuormitukset on esitetty seuraavalla sivulla olevassa kuvassa 5. [8, s. 16.]



Kuva 5. Paaluihin vaikuttavat ulkoiset kuormitukset [8, s. 46].

3.3.1 Pystykuormitus

Pystykuormista aikaluokaltaan pysyvät kuormat viedään paalujen välityksillä karkeara-keisiin maakerrokseen, moreenikerrokseen tai kalliolle, kun taas hetkellisiä kuormituksia voidaan viedä muihinkin maakerrokseen. Paalut ja paaluryhmät pyritään suunnittelemaan siten, että paalujen taivutusrasitukset pysyvät pieninä ja ettei lyöntipaaluihin kohdistu pysyvää vetokuormitusta hienorakeisten ja eloperäisten maakerrosten osuudella. [8, s. 47.]

3.3.2 Vaaka- ja momenttikuormitus

Momenttikuormia syntyy, kun yläpuolinen rakenne on kiinnitetty jäykästi perustuksiin, esimerkiksi mastojäykisteisissä rakennuksissa. Vaakakuormia perustuksille aiheutuu esimerkiksi tuuli- ja törmäyskuormista. Pystysuoratpaalut voivat siirtää vaaka- ja momenttikuormituksia vain vähän, koska ne aiheuttavat paaluille taivutusrasituksia jakautuessaan maakerrokseen. Siksi vaakakuormat viedäänkin maaperään vinopaalujen avulla. [8, s. 47.]

3.3.3 Sivukuormitus

Paaluille syntyy sivukuormitusta, kun käytetään paalun tai paaluryhmän sivu- tai momenttikapasiteettia hyväksi tai maan liikkeessa paaluja kohti. Sivukuormituksista aiheutuu paaluille taivutusrasituksia, jotka on otettava huomioon mitoittaessa paalua. Taivutusrasituksia paaluille voi aiheuttaa esimerkiksi:

- Maankaivu paalutusalueella tai sen lähellä
- paalutusalueella liikkuvat työkoneet
- paalun suuntaisen kuorman epäkeskisyys
- maan painuminen vinopaalujen ympärillä.

Paalujen on kestävä paalun suuntaisten kuormien kanssa samanaikaisesti kaikki käyrydestä, momenttikuormituksesta ja edellä esitetyistä tekijöistä aiheutuvat taivutusrasitukset. [8, s. 47-48.]

3.3.4 Negatiivinen vaippahankaus

Kun hienorakeiset tai eloperäiset maat paalun ympärillä painuvat enemmän kuin paalu, syntyy negatiivinen vaippahankaus. Maan painumista voi aiheutua täytemaasta, pohjaveden alenemisesta tai itse paalutustyöstä. Negatiivinen vaippahankaus ei yleensä vaikuta samanaikaisesti lyhytaikaisten kuormien kanssa ja paalujen suunnittelussa negatiivinen vaippahankaus huomioidaan pienentämällä paalun sallittua paaluvoimaa. [8, s. 48-49.]

3.4 Paalutuksen suunnittelu

Alustavassa suunnittelussa arvioidaan paaluanturan kokoa sekä tarvittavien pysty- ja vinopaalujen lukumäärää ja niiden sijaintia. Alustava pysty- ja vinopaalujen vähimmäismääriä voidaan arvioida kaavoilla 4. Vinopaalujen kaavassa on huomiotu, että vaakakuorma voi vaikuttaa molemmissa suunnissa, jolloin myös vinopaaluja tarvitaan molempiin suuntiin. [10, s. 44, 48]:

$$n_p > V_{max}/N_{sall} \quad (4)$$

$$n_v > (V_{max} + H_{max}/2\sin(\alpha))/N_{sall}$$

n_p on pystypaalujen määrä

V_{max} on pystysuuntainen kuormitus

N_{sall} on tukipaalun sallittu puristava normaalivoima = $\sigma_{sall} \cdot A$

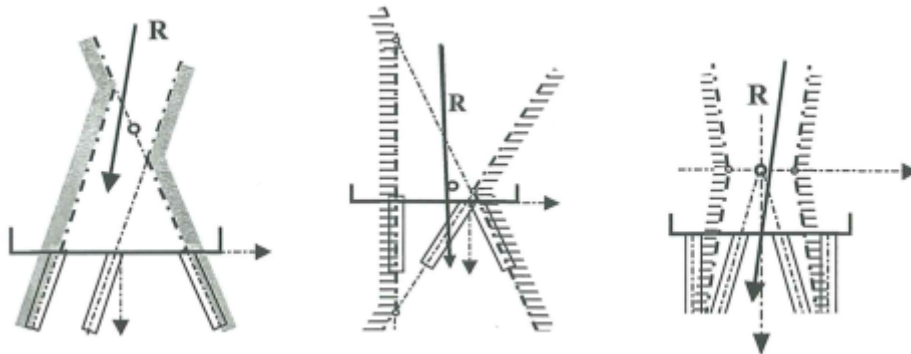
n_v on vinopaalujen määrä

H_{max} on vaakasuuntainen kuormitus

$\sin(\alpha)$ on vinopaalun kaltevuus, jonka on hyvä olla mahdollisimman suuri, jotta vinopaalujen määrä saadaan pieneksi.

3.4.1 Paalujen sijoittelu

Paalut on tärkeää sijoittaa tarpeeksi etäälle toisistaan, sillä liian lähekkäin olevat paalut voivat vahingoittaa toisiaan kun niitä lyödään maahan. Myös liian lähelle toisiaan sijoitetut kitka- ja koheesiopaalut heikentävät toistensa kantavuutta toimintatavastaan johtuen. Oikealla sijoittelulla vaikutetaan paalutuksen jäykkyyteen ja kiertokeskiön sijaintiin. Kun resultanttien vaikutussuorat kulkevat mahdollisimman läheltä kiertokeskiötä ja sijaitsevat käytävässä, jossa ne aiheuttavat paaluihin vain puristusta (kuva 6), on paalutus lähellä optimia.



Kuva 6. Vetovapaa käytävä erilaisissa staattisesti määrätyissä tapauksissa [10, s. 49].

Yhdensuuntaisten tuki- ja kitkapaalujen keskiöetäisyyksien tulee aina olla vähintään 0,8 metriä. Lisäksi keskiöetäisyyksien tulee täyttää seuraavalla sivulla olevan taulukon 1 ehdot. [5, s. 76; 8, s. 91; 10, s. 47.]

Taulukko 1. Tuki- ja kitkapaalujen keskiöetäisyydet katkaisutasossa [8, s. 90].

Paalun pituus (m)	Tuki- ja kitkapaalu		Koheesiopaalu	
	Pyöreä	Neliömäinen	Pyöreä	Neliömäinen
10	2,7 d	3 d	4 d	4,5 d
10–25	(väliarvot interpoloidaan)		5 d	5,6 d
25	3,5 d	4 d	6 d	6,8 d

Keskiöetäisyyksiä ja paaluanturan kokoa suunniteltaessa on suositeltavaa ottaa huomioon, että paalu voi rikkoontua lyönnin aikana ja korvaava paalu olisi hyvä saada lähelle. Työteknisistä syistä paalut on suositeltavinta sijoittaa suoriin riveihin. Usein paaluanturan kokoa rajoittaa yläpuolinen rakenne. Liian iso keskiöetäisyys taas voi aiheuttaa paaluanturaan taivutuksia, halkeamia ja lisäksi kustannustekijät ajavat paaluanturat yleensä mahdollisimman pieniksi. [10, s. 44, 50.]

Suurpaaluilla, eli paaluilla, joiden kantavuus on noin 1,5 MN tai enemmän ja joiden halkaisija on paalutyypistä riippuen vähintään 300 – 500 mm, yhdensuuntaisten vaippapintojen lyhin etäisyys lasketaan kaavalla 5 [7, s. 172; 9, s. 21]:

$$e_i = 300 + 0,7 * d \quad (5)$$

e_i on vaippapintojen lyhin etäisyys

d on paalun halkaisija

Risteävien paalujen risteyskohdat pyritään sijoittamaan mahdollisimman lähelle maanpintaa, jolloin paalujen keskinäiset etäisyydet voivat olla pienet. Viiden metrin syvyydessä paalujen keskiöetäisyyksien tulee olla vähintään 2 d ja 10 metrin syvyydessä taulukon 1 mukaisia. Käytettäessä suurpaaluja paalujen minimietäisyys toisistaan riippuu paalujen risteyskohdan syvyydestä, minimietäisyys määritetään kaavalla 6 [7, s. 172; 8, s. 91]:

$$e_r = 50 * l_r \geq e_i \quad (6)$$

e_r on risteävien paalujen minimietäisyys toisistaan [mm]

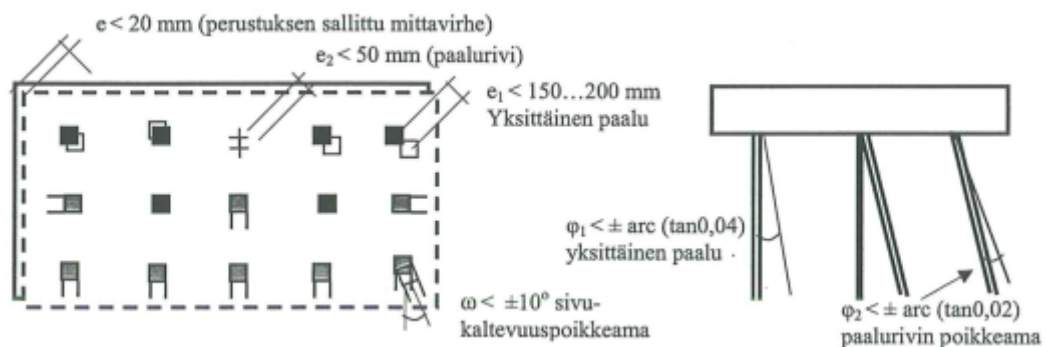
l_r on risteyskohdan syvyys [m]

Perustuksiin tulevaa vaakakuormitusta otetaan vastaan vinopaaluilla. Vinopaalujen kaltevuus voi enimmillään olla 3:1, mutta paalutustyössä käytettävä kalusto voi aiheuttaa rajoituksia käytettäville paalukaltevuuksille. Kaltevuus 4:1 on yleensä saavutettavissa. Suurempia kaltevuuksia tulisi välttää, sillä muuten vinopaaluihin voi syntyä suuria taivutusrasituksia, jotka heikentävät paalun kantokykyä. [5, s. 77; 8, s. 92.]

Paaluanturan reunan etäisyys lähimmästä paalusta on oltava sellainen, että antura kestää paaluvoimien aiheuttamat jännitykset eikä anturan reunan lohkeamisvaaraa ole. Lisäksi anturan teräksillä tulee olla riittävä tartuntapituus. Normaalitapauksissa paaluanturan reunan etäisyyden lähimmän paalun ulkopinnasta tulisi olla vähintään puolet paalun paksuudesta lisättynä sallitulla paalun sijaintipoikkeamalla. [8, s. 91.]

3.4.2 Sallitut mitta- ja sijaintipoikkeamat

Pohjasuhteiden ja mittausepätkarkkuuksien vuoksi paaluja ei saada paalutettua tarkalleen suunnitelluille paikoille. Paalutusohjeiden mukaan yksittäisen paalun, paalulaatan tai paaluhatturakenteen paalun sivusuuntainen poikkeama saa olla enintään 100 mm ja paalukaltevuuden poikkeama saa olla enintään 40 mm/m. Pienten paaluryhmien yksittäiset paalut saavat poiketa teoreettisesta sijaintipaikastaan enintään 150 mm ja näitä suurempien paaluryhmien yksittäisen paalun sijaintipoikkeama saa olla enintään 200 mm. Samansuuntaisten paalujen paalurivin tai -ryhmän painopistepoikkeama voi olla enintään 50 mm ja paalukaltevuuden poikkeama enintään 20 mm/m. Sallitut mitta-, sijainti- ja kaltevuuspoikkeamat on esitetty kuvassa 7. [5, s. 77; 8, s. 93.]

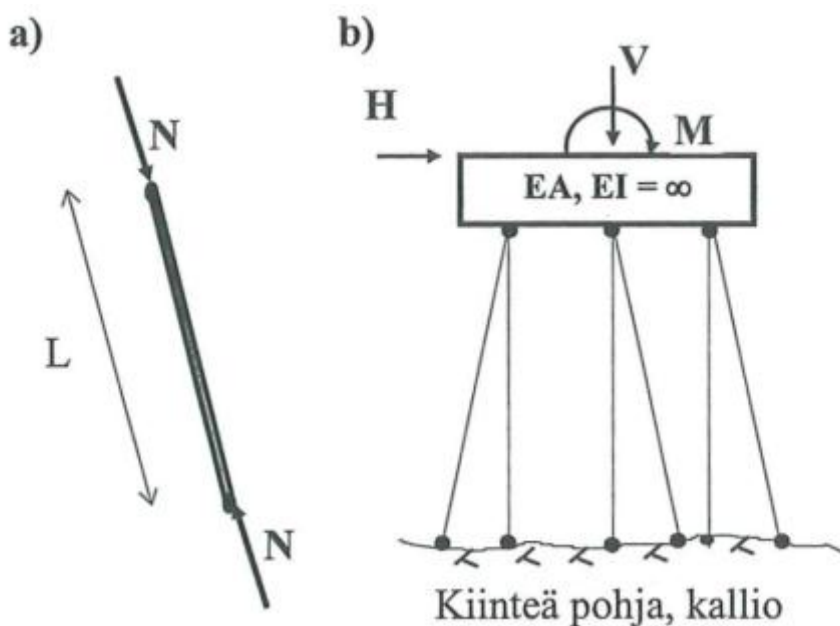


Kuva 7. Paalutuksen sallitut mitta-, sijainti- ja kaltevuuspoikkeamat [10, s. 45].

4 Paaluvoimien määrittäminen

Tässä opinnäytetyössä keskitytään tukipaalujen paaluvoimien laskemiseen, sillä kitkapaalun kantavuuden määrittäminen epätarkkuudesta ja koheesiopaalutuksen painuvuudesta johtuen niitä ei käytetä suurempien rakennusten paalutukseen. Rakenteena tukipaalutus on lähinnä verrattavissa ristikkoon ja tukipaalutuksen yksittäinen paalu ristikkosauvaan. Rakenteen kantavuus perustuu paalujen puristuslujuuteen, sillä kuormituksesta aiheutuu paaluille lähinnä normaalivoimia. [10, s. 28.]

Ristikkosauvamallissa kitkan ja koheesion vaikutus kantavuuteen voidaan jättää huomiotta, kun paalut on lyöty kovaan pohjaan asti. Paalut ovat tavallisesti puristettuja rakenneosia, joten niitä ei yleensä tarvitse ankkuroida paalulaattaan. Yksittäisen paalun yläpää voidaan olettaa nivelelliseksi ja paalujen yläpäitä yhdistävä peruslaatta tai -antura oletetaan täysin jäykäksi, jolloin paaluperustuksen rakennemalli on kuvan 8 mukainen.



Kuva 8. Tukipaalutus. a) Yksittäisen paalun ristikkosauvamalli. b) Tukipaalutuksen rakennemalli [10, s. 28].

4.1 Geometrialtaan yksinkertaisten tukipaalutusten laskenta

Yksinkertaisilla tukipaalutuksilla tarkoitetaan staattisesti määrättyjä paalutuksia ja muita erikoistapauksia, joissa paaluvoimat voidaan ratkaista suoraan voimien tasapainoyhtälöstä [10, s. 28].

4.1.1 Pystysuorat tukipaalut

Kun sivusuuntaiset kuormat ovat pieniä, käytetään paaluperustuksissa vain pystysuoria paaluja. Pystysuoria paaluja käytettäessä paaluille ei voi laskea syntyvän rasisitusta vaakakuormista, vaan paalut mitoitetaan vain pystykuormalle ja momenttirasitukselle. Vaakakuormat on johdettava maaperään muilla tavoin, esimerkiksi paaluanturan ja paalujen sivuille syntyvän passiivipaineen avulla, muihin rakenteisiin tukeutuvilla rakenneosilla jne. [10, s. 28.]

Täysin samanlaiset paalut ja keskeinen pystykuorma

Jos paalut ovat tasajäykkiä, kuormien resultantti on pystysuora ja se vaikuttaa paaluryhmän painopisteessä, ei paalutuksessa tapahdu kiertymää ja yksittäisen paalun paaluvoima saadaan jakamalla pystykuorma tasan kaikille paaluille (kaava 7). [10, s. 29.]

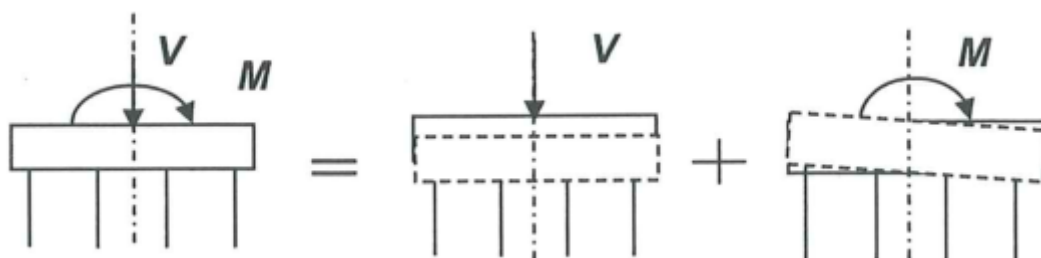
$$N_i = \frac{V}{\sum n_i} \quad (7)$$

N_i on yhteen paaluun syntyvä paaluvoima

$\sum n_i$ on kaikkien paalujen lukumäärä

Tasotapaukset, pysty- ja momenttikuormitus

Tapauksissa, joissa paalutuksen kuormituksella on pystykomponentti ja taivutusmomentti, tai jossa pystykuorman kuormitusresultantti on epäkeskeinen, saadaan yksittäinen paaluvoima lisäämällä tai vähentämällä pystykuorman ja momentin aiheuttamat osuudet paaluvoimiin. Tapaus voidaan ajatella kahtena erillisenä tapauksena, jossa ensimmäinen on keskeisen pystykuorman V aiheuttama kuormitus ja toinen vain momentin M aiheuttama kuormitus (kuva 9). [10, s. 29.]



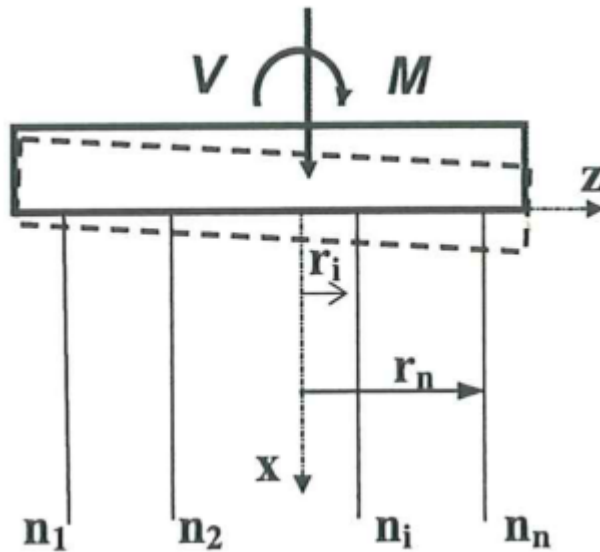
Kuva 9. Pystykuorman V ja momentin M aiheuttamat osuudet paaluvoimiin [10, s. 29].

Pystykuormasta aiheutuva yksittäisen paalun paaluvoiman laskeminen on esitetty edellä. Momentin aiheuttama kuormitus voidaan laskea kaavalla 8 (kuva 10):

$$N_i = \frac{M * r_i}{\sum n_i r_i^2} \quad (8)$$

r_i on paalurivin i etäisyys paalutuksen painopisteakselista [m]

$\sum n_i$ on paaluriviin i kuuluvien paalujen lukumäärä [kpl]



Kuva 10. Kaavan 8 merkintöjä [10, s. 29].

Paalujen ollessa tasajäykkiä määräytyy paalutuksen painopisteakselin sijainti kaavalla 9:

$$z_0 = \sum n_i r_i \quad (9)$$

z_0 on paaluryhmän painopisteakselin sijainti x-akselin suunnassa

n_i on paaluriviin i kuuluvien paalujen lukumäärä

r_i on paalurivin i z-koordinaatti anturan keskipisteestä

Paaluryhmän yhden paalun paalukuorma on, kuten kuvasta 9 nähdään, kahden edellä esitetyn kuormitustilanteen summa. Paaluryhmän yhden paalun paalukuorma saadaan siis kaavasta 10 [5, s. 67; 10, s. 29]:

$$N_i = \frac{V}{\sum n_i} + \frac{M * r_i}{\sum n_i r_i^2} \quad (10)$$

r_i on paalurivin i etäisyys paalutuksen painopisteakselista

$\sum n_i$ on paaluriviin i kuuluvien paalujen lukumäärä

M on taivutusmomentti x -akselin suunnassa

r_i on paalurivin etäisyys paalutuksen painopisteakselista x -akselin suunnassa

Kun paalujen jäykkyydet vaihtelevat, eli samassa paaluryhmässä olevien paalujen poikkileikkausala, kimmokerroin tai pituus vaihtelee, sijoitetaan origo paalutuksen painopisteakselille, joka voidaan määrittää kaavalla 11 [10, s. 29]:

$$z_0 = \frac{\sum n_i k_i r_i}{\sum n_i k_i} \quad (11)$$

n_i on paaluriviin i kuuluvien paalujen lukumäärä

r_i on paalurivin z -koordinaatti anturan keskipisteestä

k_i on paalun jäykkyys, joka saadaan kaavalla 12 [10, s. 30]:

$$k_i = \frac{E_i A_i}{L_i} \quad (12)$$

E_i on paalun kimmokerroin

A_i on paalun poikkileikkausala

L_i on paalun pituus

Paalujen jäykkyyksien vaihdellessa paalurivissä i sijaitsevan yksittäisen paalun paaluvoima saadaan kaavalla 13 [10, s. 30]:

$$N_i = \frac{k_i * V}{\sum n_i k_i} \pm \frac{k_i r_i * M}{\sum n_i k_i r_i^2} \quad (13)$$

k_i on yksittäisen paalun jäykkyys (kaava 11)

n_i on paaluriviin i kuuluvien paalujen lukumäärä

r_i on paalurivin z -koordinaatti paalutuksen painopisteakselilta

Momentti M tulee laskea paalutuksen painopisteakselin suhteen. [10, s. 30]

Avaruustapaus, missä kuormitus on epäkeskeinen kahdessa suunnassa

Jos kuormitus on epäkeskeinen kahdessa suunnassa tai paalutukseen vaikuttaa taivutusmomentti kahdessa suunnassa, saadaan paaluvoimien yhtälöt samalla tavalla kuin

tasotapauksessa. Paalutuksen redusoidun painopisteakselin paikan y- ja z- suunnassa määritellään kaavalla 14. [10, s. 30]:

$$y_0 = \frac{\sum k_{yi} r_{yi}}{\sum k_i} \quad (14)$$

$$z_0 = \frac{\sum k_{zi} r_{zi}}{\sum k_i}$$

Kun kuormakomponentit on redusoitu origoon ja y- ja z- akselit ovat paalutuksen pääjäyhyysakselit, yksittäisen paalun normaalivoima saadaan yhtälöstä 15 [10, s. 30]:

$$N_i = \frac{k_i * V}{\sum k_i} + \frac{k_i r_{zi}}{\sum k_i r_{zi}^2} * M_y - \frac{k_i r_{yi}}{\sum k_i r_{yi}^2} * M_z \quad (15)$$

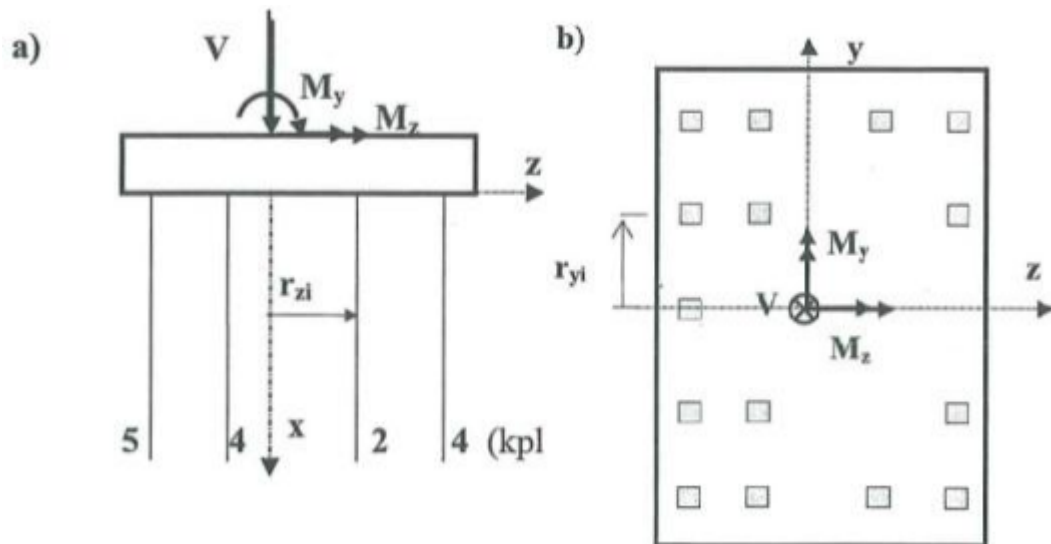
Jos paalut ovat tasajäykkiä, jäykkyysstermit k supistuvat pois ja yksittäisen paalun paaluvoima saadaan yhtälöstä 16 [10, s. 30]:

$$N_i = \frac{V}{n} + \frac{r_{zi}}{\sum r_{zi}^2} * M_y - \frac{r_{yi}}{\sum r_{yi}^2} * M_z \quad (16)$$

n on kaikkien paalujen lukumäärä

r_{zi} ja r_{yi} on paalujen momenttivarret z- ja y- akselien suhteen

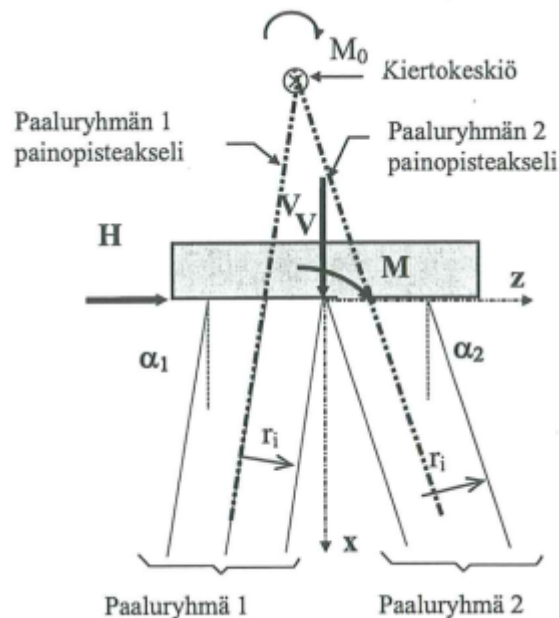
Jos paalutus on symmetrinen jonkun tason suhteen, kuten esimerkiksi kuvassa 9 xz- taso, on symmetria-akseli aina paalutuksen pääjäyhyysakseli. Jos pääjäyhyysakselien suunnat eivät ole ennalta tiedossa, kannattaa paaluvoimat useimmiten määrittää siirtymämenetelmällä. Momentin aiheuttamien paaluvoiman merkki voidaan pystysuorien paalujen tapauksessa päätellä helposti momenttikomponenttien suunnista. Laskettaessa paaluvoimia kaavoilla 15 ja 16, ulkoisten momenttien suunnat ovat positiivisia, kun ne kiertävät kuvan 11 mukaisesti. Yksittäisten paalujen etäisyydet pääjäyhyysakseleista on sijoitettava kaavoihin etumerkkeineen. Kuvan 11 tapauksessa itseisarvoiltaan suurimmat ja pienimmät paaluvoimat syntyvät johonkin origosta kauimmaisena olevaan nurkkapaaluun. [10, s. 30.]



Kuva 11. Avaruustapaus, pystypaalut. a) xz-taso, b) yz-taso [10, s. 30].

4.1.2 Tasotapaus, missä paaluja on kahdessa eri suunnassa

Jos paalutuksen pääjäyhyystaso on symmetria-akseleiden kautta selvitetävissä, voidaan paalutusta tarkastella ko. tasossa vaikuttavien suhteen tasotapauksena. Kuvassa 12 on esimerkki symmetriatasosta.



Kuva 12. Paalut kahdessa suunnassa, kiertokeskiö.

Kuvassa 12 näkyvällä kiertokeskiöllä tarkoitetaan tasopaalutuksessa sitä xz-tason pistettä, jossa rakenteen voima- ja momenttiyhtälöiden vaikutusta voidaan tarkastella erikseen, sillä ne tulevat toisistaan riippumattomiksi. Kiertokeskiöön redusoitu ulkoinen

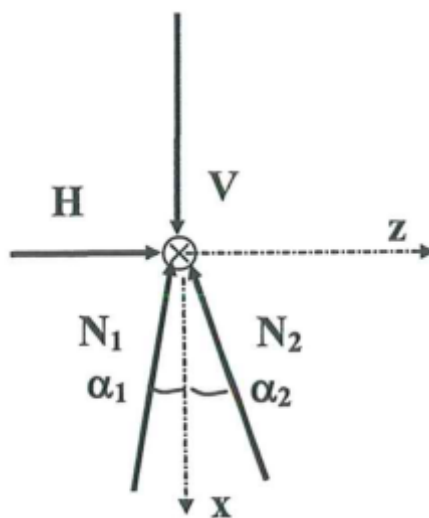
momentti aiheuttaa paalutukselle kiertymää kiertokeskiön ympäri kun taas kiertokeskiön kautta kulkeva voimaresultantti ei aiheuta paalutukselle kiertymistä. Kiertokeskiön paikka voidaan määritellä yhdensuuntaisten paaluryhmien jäykkyyksillä painotettujen painopisteakselien leikkauspisteenä, jos paalut sijaitsevat tasopaalutuksessa kahdessa eri suunnassa (erikoistapaus).

Pystysuuntaisen kuormituksen ja momenttikuormituksen lisäksi paalutukseen voi kohdistua myös vaakasuuntaisia kuormia (voima H kuvassa 12). Vaakakuormia vastaanottamaan käytetään vinopaaluja. Mikäli paaluja on vain kahdessa rivissä, on paalutus epästabiili momenttikuormille. Jos käytetään paalutusta, jossa on vain kaksi paaluriviä, on momentti kiertokeskiön suhteen laskettuna oltava ≈ 0 , tai rakenteen kiertyminen on estettävä jollain muulla tavalla. [10, s. 31.]

Paalut kahteen suuntaan kaltevia

Oletetaan, että ulkoinen momentti $M = 0$ ja lasketaan yhdensuuntaisten paaluryhmien paaluvoimien resultantit N_1 ja N_2 . Ne saadaan koordinaattiakselien suuntaisten voimien tasapainoehdoilla. Kuvan 13 tapauksessa tasapainoehdoista saadaan paaluryhmien 1 ja 2 resultanteiksi [10, s. 31]:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_1} (\sin \alpha_2 * V - \cos \alpha_2 * H) \\ N_2 &= \frac{1}{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_1} (\sin \alpha_1 * V + \cos \alpha_1 * H) \end{aligned} \quad (17)$$



Kuva 13. Paaluvoimien resultanttien määrittäminen voimavektorien tasapainosta [10, s. 31].

Jos paalutus on symmetrinen xy-tason suhteen, ja kuvassa 13 esitetty $\alpha_1 = \alpha_2$, sievenee kaava 17 muotoon [10, s. 32]:

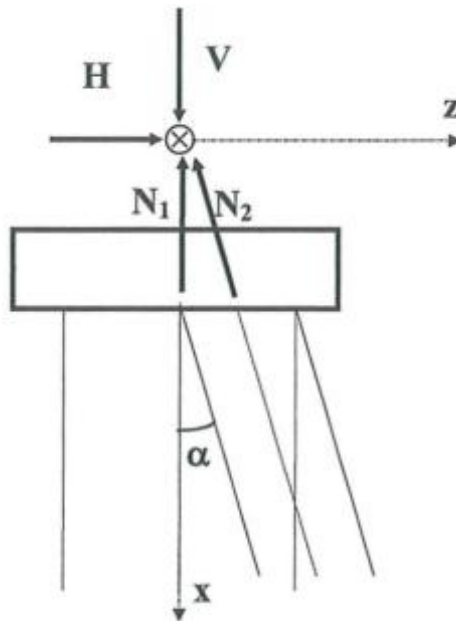
$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{2 \cos \alpha} V - \frac{1}{2 \sin \alpha} H \\ N_2 &= \frac{1}{2 \cos \alpha} V + \frac{1}{2 \sin \alpha} H \end{aligned} \quad (18)$$

Kuvan 13 tapauksessa pystykuorma V aiheuttaa puristusta kaikkiin paaluihin ja vaakakuorma H vetoa vasemmalle kalteviin paaluihin [10, s. 32].

Toinen paaluryhmistä pystysuora

Jos toinen paaluryhmä koostuu pystysuorista paaluista (kuva 14) muuttuvat paaluvuomien kaavat seuraavaan muotoon [10, s. 32]:

$$\begin{aligned} N_1 &= V - \cot \alpha * H \\ N_2 &= \frac{1}{\sin \alpha} H \end{aligned} \quad (19)$$



Kuva 14. Toinen paaluryhmistä pystysuora [10, s. 32].

Pystykuorma V kannatetaan kokonaisuudessaan pystysuorilla paaluilla ja vinopaalut saavat kuormaa ainoastaan vaakakuormasta H [10, s. 32].

Sivullepäin kaltevat paalut

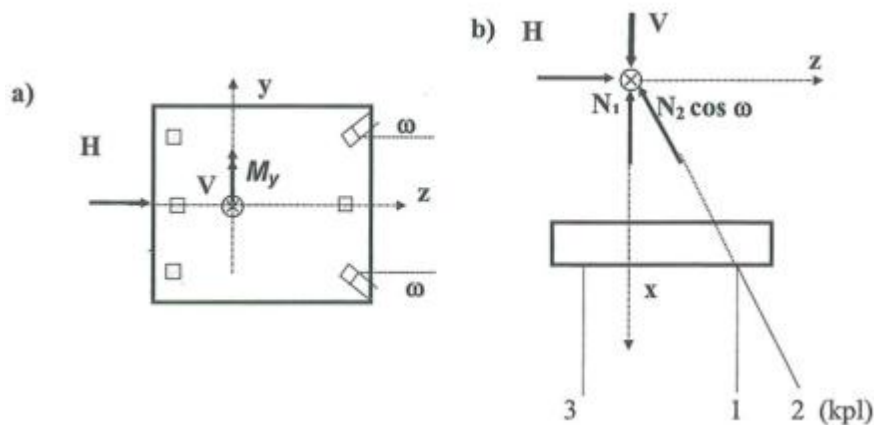
Jos paaluryhmässä on vinopaaluja, jotka eivät ole y- tai z-akselin suuntaisia (kuva 15), tulee ne huomioida vaakasuuntaisten voimien tasapainoehdoissa. Tasapainoyhtälöt ovat muotoa [10, s. 32]:

$$V = N_1 \cos \alpha_1 + N_2 \cos \alpha_2 \quad (20)$$

$$H = -N_1 \sin \alpha_1 + N_2 \cos \omega * \sin \alpha_2$$

α on vinopaalun pystykaltevuus

ω on paalun sivukaltevuus



Kuva 15. Sivukaltevat paalut, a) tasokuva, b) sivukuva [10, s. 32].

Paaluryhmien resultanteille saadaan kuvan 15 tapauksessa, missä paaluryhmän 1 paalut ovat pystysuoria, lausekkeet [10, s. 32]:

$$N_1 = V - \frac{\cot \alpha}{\cos \omega} * H \quad (21)$$

$$N_2 = \frac{1}{\cos \omega \sin \alpha} * H$$

Momenttikuormitusten huomioiminen

Momenttikuormitus lisää tai vähentää paaluryhmän yksittäisen paalun paaluvoimaa. Se huomioidaan kaavalla 22 [10, s. 33]:

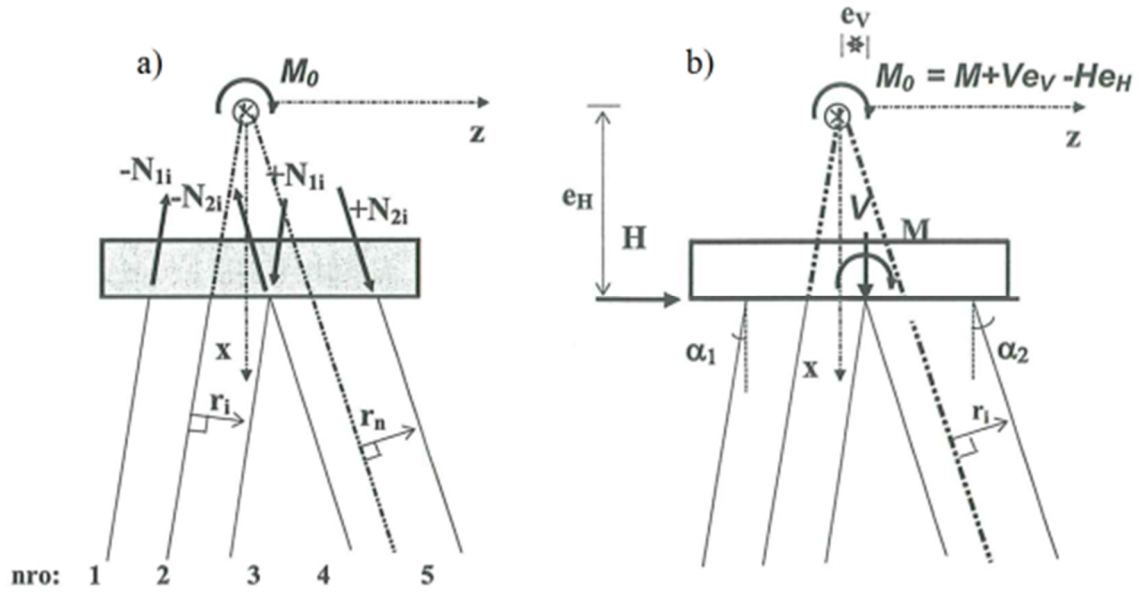
$$N_i = \frac{k_i r_i}{\sum n_i k_i r_i^2} M_0 \quad (22)$$

r_i on paalurivin kohtisuora etäisyys paalutuksen kiertoakeskiöstä

k_i on paalun jäykkyys

M_0 on paalutuksen kiertoakeskiöön redusoitu momentti

Jos paalut ovat keskenään yhtä jäykkiä, supistuu jäykkyystermi k_i kaavasta pois.



Kuva 16. a) Ulkoisen momentin laskenta kiertokeskiön suhteen, b) momenttikuormituksen vaikutuksen kuvaaminen paaluriveihin kohdistuvilla voimapareilla [10, s. 33].

Kaavassa 22 käytettävä etumerkki voidaan yleensä päätellä esimerkiksi korvaamalla kiertokeskiöön vaikuttava momenttikuorma paaluihin kohdistuvilla voimapareilla. Esimerkiksi kuvan 16 tapauksessa paaluriveihin 1 ja 4 syntyy vetoa ja paaluihin 3 ja 5 puristusta. Koska paalurivi 2 kulkee kiertokeskiön kautta, ei momenttikuorma aiheuta siihen lisärasituksia. Laskennallisesti lausekkeen etumerkki määräytyy momenttivarren r_i etumerkin mukaan, kun momentin positiivinen suunta on valittu samalla tavalla kuin kuvassa 16. Jos paalut ovat sivukaltevia, ne projisoidaan ensin xz-tasolle ja etäisyydet kiertokeskiöstä määritetään samalla tavalla. [10, s. 33.]

Paaluvoimat

Kaavoissa 17-21 esiintyvät paaluryhmien voimien resultantit N_1 ja N_2 jakaantuvat yksittäisille paaluille paaluryhmien sisällä jäykkyyksien suhteessa. Lisäämällä momenttikuormasta tuleva osuus, saadaan paaluryhmien 1 ja 2 yksittäisen paalun paaluvoimat kaavalla 23 [10, s. 33]:

$$N_{1i} = \frac{k_{1i} N_1}{\sum n_{1i} k_{1i}} \pm \frac{k_i r_i}{\sum k_i r_i^2} M_0 \quad (23)$$

$$N_{2i} = \frac{k_{2i} N_2}{\sum n_{2i} k_{2i}} \pm \frac{k_i r_i}{\sum k_i r_i^2} M_0$$

Jos paalut ovat tasajäykkiä paaluryhmän sisällä, voimaresultantit N_1 ja N_2 jakaantuvat tasan ryhmän paaluille, ja kaava 23 supistuu muotoon [10, s. 33]:

$$\begin{aligned} N_{1i} &= \frac{N_1}{\sum n_{1i}} \pm \frac{k_i r_i}{\sum k_i r_i^2} M_0 \\ N_{2i} &= \frac{N_2}{\sum n_{2i}} \pm \frac{k_i r_i}{\sum k_i r_i^2} M_0 \end{aligned} \quad (24)$$

4.1.3 Staattisesti määrätyt paalutukset

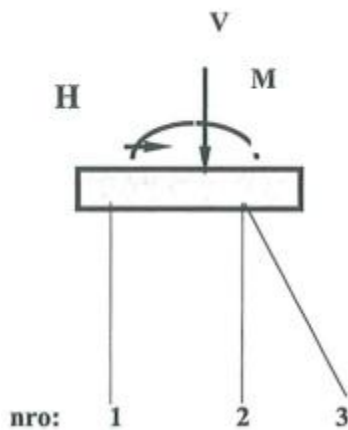
Staattisesti määrätyn paalutuksen paaluvoimat voidaan aina määrittää voimien tasapainotarkastelulla.

Tasopaalutus

Jos paalurivien lukumäärä tasoprojektiossa on tasan kolme ja paalutus on stabiili, on käytettävissä kolme tasapainoyhtälöä, joista paaluvoimat voidaan määrittää. Paalutus on epästabiili eli mekanismi, kun:

- Paalurivejä tai paalutussuuntia on tasossa vähemmän kuin kolme
- Paalut ovat yhdensuuntaisia, esimerkiksi käytetään pelkästään pystysuoria paaluja
- Kaikkien paaluvoimien vaikutussuorat leikkaavat toisensa samassa pisteessä

Epästabiilissa paalutuksessa siirtymät epästabiiliin suuntaan voivat kasvaa suuriksi, jonka takia niitä ei ole hyvä käyttää. Jos epästabiileja paalutuksia käytetään, tulee mitoituksessa joko osoittaa, että ko. kuormakomponentti, jonka suunnassa paalutus on epästabiili, on niin pieni, ettei sitä tarvitse huomioida tai selvittää, millä tavoin ko. komponentti siirretään maapohjaan. Kuvassa 15 on esitetty tasopaalutus, joka on stabiili kaikille tasossa vaikuttaville komponenteille. Paaluvoimat lasketaan siirtymämenetelmällä, jos tasopaalutuksessa on enemmän kuin kolme erisuuntaista paaluriviä, koska silloin paalutus on staattisesti määräämätön. [10, s. 34.]



Kuva 17. Stabiili tasopaalutus [10, s. 34].

Kuvan 17 kolmen paalurivin paaluvoimien laskemiseksi saadaan tasapainoyhtälöt:

$$\sum F_x = 0 \quad (25)$$

$$\sum F_z = 0$$

$$\sum M_y = 0$$

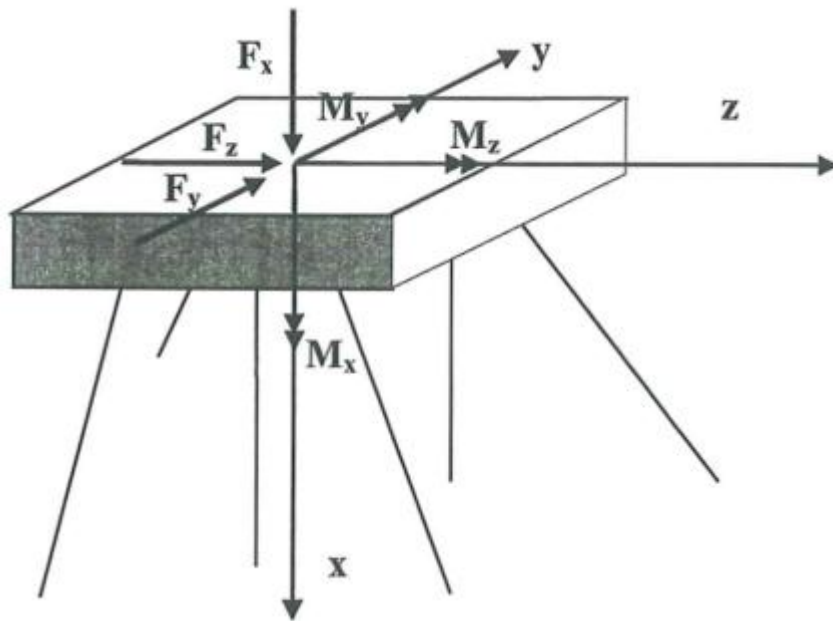
[10, s. 34]

Kuuden paalun avaruuspaalutus

Kolmiulotteisessa avaruudessa staattisesti määrättyssä paalutuksessa on kuusi paalua. Tällöin on käytettävissä kuusi tasapainoyhtälöä, joista voidaan laskea yksittäisen paalun paaluvoima, kun paalutus on stabiili kaikille kuormituskomponenteille. Avaruuspaalutus on epästabiili ja muuttuu mekanismiksi, jos

- Paaluja on vähemmän kuin 6 kappaletta,
- Paalut ovat yhdensuuntaisia jossain tasoprojektiossa, tai
- Paalujen vaikutussuorien projektiot leikkaavat jossain tasossa toisensa samassa pisteessä.

Stabiili avaruuspaalutus on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Staattisesti määrätty paalutus, avaruuskoordinaatisto ja paalutukseen kohdistuvat kuormakomponentit.

Paaluvoimien ratkaisemiseen on käytössä kolme voima- ja kolme momenttitasapainoyhtälöä:

$$\begin{array}{ll}
 \sum F_x = 0 & \sum M_x = 0 \\
 \sum F_z = 0 & \sum M_y = 0 \\
 \sum M_y = 0 & \sum M_z = 0
 \end{array} \quad (26)$$

Jos paalutus on hyperstaattinen, eli paaluja on enemmän kuin 6 kappaletta, on paaluvoimien ratkaiseminen helpointa suorittaa siirtymämenetelmällä [10, s. 35].

4.2 Tukipaalutuksen paaluvoimien selvittäminen siirtymämenetelmällä

Paalutuksen ollessa staattisesti määräämätön eli hyperstaattinen, ei paaluvoimia voida määrittää suoraan tasapainoyhtälöillä vaan paaluvoimien laskentaan tarvitaan myös siirtymien yhteensopivuusehtoja. Siirtymämenetelmässä aluksi ratkaistaan valitun pisteen siirtymäkomponentit. Koska paaluantura oletetaan täysin jäykäksi kappaleeksi, tiedetään yhden valitun pisteen siirtymien perusteella myös anturan muiden pisteiden siirtymät. Anturan siirtymäkomponenttien perusteella voidaan laskea kunkin paalun saama kokoonpuristuma ja sitä kautta saadaan paaluvoimat selville. Siirtymämenetel-

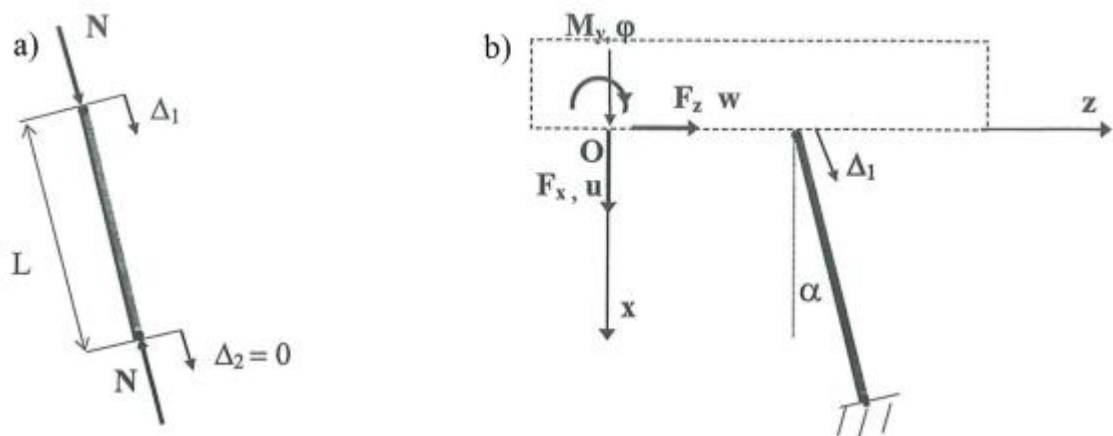
mä on helpoin tapa ratkaista hyperstaattisia paalutuksia, sillä tasopaalutuksessa on enintään kolme ja avaruuspaalutuksessa enintään 6 tuntematonta siirtymäkomponenttia, huolimatta paalujen määrästä. [10, s. 36.]

4.2.1 Tasotapaus

Ulkoisten kuormakomponenttien siirtymät ja paaluvoimat voidaan laskea ns. tasotapauksena, mikäli paalutuksella on symmetriataso [10, s. 36].

Ratkaisuyhtälöiden johtaminen

Paalun jäykkyys k_i (kaava 11, s. 22) ilmaisee yksittäisen paalun päässä paaluakselin suunnassa vaikuttavan voiman ja vastaavan kokoonpuristuman välisen yhteyden [10, s. 36].



Kuva 19.

a) Paalun päihin vaikuttava aksiaalinen puristusvoima N ja akselin suurtaiset siirtymät Δ_1 ja Δ_2 , b) Paaluanturan siirtymäkomponenttien ja paalun kokoonpuristuman suhde [10, s. 37].

Paaluvoiman ja paalun kokoonpuristuman yhteys selviää Hooken lain avulla. Paalun suhteellinen puristuma saadaan jakamalla kokoonpuristuma paalun pituudella, jolloin suhteellinen puristuma on $\varepsilon = (\Delta_2 - \Delta_1)/L$. Kun paalun suhteellinen puristuma kerrotaan paalun kimmokertoimella E , saadaan selville paalun jännitys: $\sigma = E\varepsilon$. Paalun normaali-voima saadaan kertomalla paalun jännitys paalun pinta-alalla. Normaalivoiman yhtälöksi saadaan [10, s. 37]:

$$N = \frac{EA}{L} * (\Delta_2 - \Delta_1) \quad (27)$$

Koska tukipaalun alapään oletetaan tukeutuvan täysin jäykkään kallioon, voidaan olettaa, ettei paalun alapää siirry, jolloin $\Delta_2 = 0$. Paalun puristusvoima saadaan positiiviseksi suureeksi, kun vaihdetaan Δ_1 :n etumerkki. Paaluvoiman kaava supistuu muotoon:

$$N = k * \Delta_1 \quad (28)$$

k on paalun jäykkyys $= EA/L$

Paalutuksen johonkin pisteeseen vaikuttavien koordinaattiakselien suuntaisten voimakomponenttien (F_x , F_z ja M_y) ja pisteen siirtymien (u , w ja φ) välinen yhteys voidaan johtaa vastaavalla tavalla koko paalutukselle. Yhtälöt voidaan muodollisesti kirjoittaa matriisimuotoon seuraavasti [10, s. 37]:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \varphi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_y \end{Bmatrix} \quad (29)$$

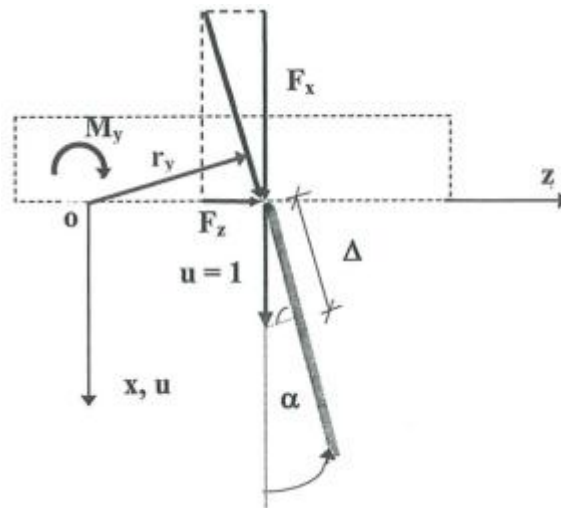
$$= [K]\{\delta\} = \{f\} \quad (30)$$

$[K]$ on paalutuksen jäykkyysmatriisi

$\{\delta\}$ on siirtymävektori

$\{f\}$ on voimavektori

Antamalla vuoronperään yksittäiselle siirtymäkomponentille (u , w tai φ) yksikön suuruinen arvo muiden ollessa nollia, ja laskemalla tämän siirtymätilan aiheuttamat voimakomponentit paalun yläpäässä, saadaan ratkaistua jäykkyysmatriisin $[K]$ alkiot kaavassa 29. Tällöin voimakomponentit ovat suoraan siirtymäkomponenttia vastaavan jäykkyysmatriisin pystyrivin alkiot. Jos esimerkiksi annetaan siirtymäkomponentille u arvoksi 1 muiden ollessa nollia, seuraa yhtälöstä, että $k_{11} = F_x$, $k_{21} = F_z$ ja $k_{31} = M_y$ eli on laskettava asetetusta siirtymätilasta aiheutuneet voimakomponentit jäykkyysmatriisien alkioden määrittämiseksi (kuva 20).



Kuva 20. Jäykkyysmatriisin alkioiden määrittäminen [10, s. 38].

Paaluanturan pystysiirtymän u johdosta puristuu paalun yläpää kokoon matkan Δ verran. Sen suuruus saadaan u :n projektiona paalun akselille:

$$\Delta = \cos(\alpha) * u = \cos(\alpha) \quad (31)$$

Nyt paaluvoimalle saadaan yhtälön 28 perusteella lauseke:

$$N = k * \cos(\alpha) \quad (32)$$

Kun paaluvoima N jaetaan koordinaattiakselien suuntaisiin komponentteihin ja lasketaan paaluvoimasta aiheutuva momentti origon suhteen, saadaan jäykkyysmatriisin (kaava 29) ensimmäisen pystysarakkeen alkioiksi:

$$\begin{aligned} k_{11} &= F_x = \cos(\alpha) * N = k * \cos^2(\alpha) \\ k_{21} &= F_z = \sin(\alpha) * N = k * \sin(\alpha) \cos(\alpha) \\ k_{31} &= M_y = r_y * N = k * r_y * \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (33)$$

r_y on paalun normaalivoiman momenttivarsi origosta mitattuna

Johtamalla muut jäykkyysmatriisin alkio vastaavalla tavalla voidaan yhtälöryhmä 29 kirjoittaa muotoon:

$$\begin{bmatrix} k \cos^2(\alpha) & k \cos(\alpha) \sin(\alpha) & k \cos(\alpha) r_y \\ k \cos(\alpha) \sin(\alpha) & k \sin^2(\alpha) & k \sin(\alpha) r_y \\ k \cos(\alpha) r_y & k \sin(\alpha) r_y & k r_y^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \varphi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_y \end{Bmatrix} \quad (34)$$

Edellä oleva yhtälö (34) kuvaa yksittäisen paalun jäykkyyden osuutta koko paalutuksen voima-siirtymäyhtälöryhmässä [10, s. 38].

Paalutuksen jäykkyydsmatriisi valitussa koordinaatistossa saadaan lausuttua laskemalla kaikkien paalujen vaikutus yhteen. Lopullinen yhtälöryhmä siirtymäkomponenttien u , w ja φ ratkaisemiseksi on:

$$\begin{bmatrix} \sum k \cos^2(\alpha) & \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) & \sum k \cos(\alpha) r_y \\ \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) & \sum k \sin^2(\alpha) & \sum k \sin(\alpha) r_y \\ \sum k \cos(\alpha) r_y & \sum k \sin(\alpha) r_y & \sum k r_y^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \varphi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_y \end{Bmatrix} \quad (35)$$

Matriisista 35 voidaan huomata, että jäykkyydsmatriisi on kullekin paalutukselle ominainen rakennevakio ja riippuu ainoastaan paalujen jäykkyyksistä ja niiden asemasta koordinaatistoon nähden. Stabiileissa tasopaalutuksissa ratkaisuyhtälöitä on ainoastaan 3 kappaletta, joten valitun paalutuksen origon siirtymät voidaan aina määrittää, jos ulkoiset kuormakomponentit F_x , F_z ja M_y tunnetaan. Yhtälöryhmän 35 ratkaisu on matriisimerkinnöin kirjattuna:

$$\{\delta\} = [K]^{-1}\{f\} \quad (36)$$

Kun paaluanturan siirtymäkomponentit on yhdessä tason pisteessä ratkaistu, tunnetaan samalla paaluanturan kaikkien muidenkin pisteiden siirtymät, sillä paaluanturat oletetaan jäykiksi kappaleiksi. Paaluanturan siirtymien ollessa selvillä voidaan selvittää jokaisen paalutukseen kuuluvan paalun kokoonpuristuma Δ ja edelleen paaluvoima N_i . Paalun suuntakosinien ja momenttivarren avulla saadaan laskettua siirtymäkomponenteista yksittäisen paalun yläpään siirtymä. Paalun i paaluvoiman lausekkeeksi saadaan:

$$N_i = k_i * \Delta_i = k_i [\cos(\alpha)_i u + \sin(\alpha)_i w + r_{yi} \varphi] \quad (37)$$

r_{yi} on yksittäisen paalun momenttivarsi, joka saadaan yhtälöllä:

$$r_{yi} = z_i \cos(\alpha)_i - x_i \sin(\alpha)_i \quad (38)$$

z_i ja x_i on paalun yläpään paikkakoordinaatit etumerkkeineen. [10, s. 39.]

Paalutuksen paaluvoimien ratkaisun kulku on aina sama: Ensin valitaan koordinaatisto, lasketaan jäykkyysmatriisin kertoimet, redusoidaan ulkoiset kuormat valittuun origoon, muodostetaan yhtälöryhmä (kaava 35) ja ratkaistaan siirtymäkomponentit u , w ja φ . Sen jälkeen ratkaistaan paaluvoimat N_i yhtälöllä 37. [10, s. 40.]

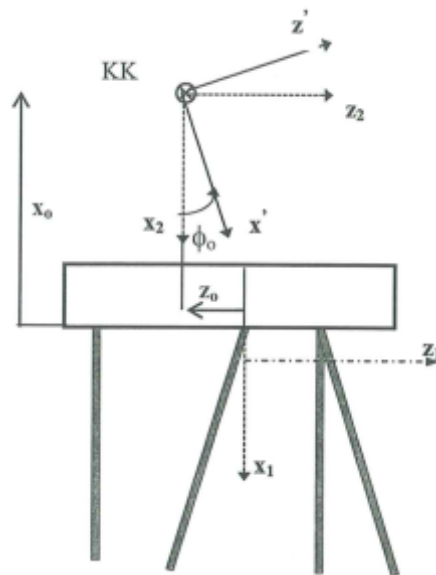
4.2.2 Pääjäykkyydet ja pääsuunta

Paalutus kantaa eniten kuormaa pääjäykkyyssuunnassa, joten on tärkeää tuntea pääjäykkyydet ja pääjäykkyyssuunnat paalutusta suunniteltaessa.

Valitsemalla koordinaattiakseliston paikka sopivasti, voidaan sillä joskus yksinkertaistaa ratkaistavaa yhtälöryhmää. Erityisesti valitsemalla koordinaattiakseliston origo paalutuksen kiertokeskiöön tulevat siirtymäkomponentit u ja w kiertymästä riippumattomiksi ja jäykkyysmatriisin termit ovat $\sum k \cos(\alpha) * r_y = \sum k \sin(\alpha) * r_y = 0$. Yhtälöryhmä 35 on silloin muotoa:

$$\begin{bmatrix} \sum k \cos^2(\alpha) & \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) & 0 \\ \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) & \sum k \sin^2(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & \sum k r_y^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \varphi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_y \end{Bmatrix} \quad (39)$$

Yllä olevasta yhtälöryhmästä saadaan kiertymän suuruus kiertokeskiön ympäri heti ratkaistua: $\varphi = M_y / (\sum k r_y^2)$.



Kuva 21. Paalutuksen kiertokeskiö ja pääsuunta [10, s. 40].

Jos lisäksi kierretään koordinaatisto paalutuksen pääsuuntaan kuvan 21 tavalla, nollautuu kerroinmatriisista lävistäjän ulkopuolinen termi $\sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha)$ ja kerroinmatriisista tulee diagonaalinen:

$$\begin{bmatrix} \sum k \cos'^2(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & \sum k \sin'^2(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & \sum k r_y^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u' \\ w' \\ \varphi' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F'_x \\ F'_z \\ M_y \end{Bmatrix} \quad (40)$$

Kerroinmatriisiin jäljelle jääneet lävistäjäalkiot ovat tasopaalutuksen pääjäykkyysstermit. Kerroinmatriisin muuttaminen lävistäjämuotoon on ominaisarvotehtävä, ja lävistäjätermit ovat alkuperäisen kerroinmatriisin ominaisarvot. Siirtymäkomponentit u' ja w' voidaan helposti määrittää pääkoordinaatiston akselien suunnissa (kuvassa 21 x' ja z') lineaarisesti riippumattomista yhtälöistä, mutta kerroinmatriisin alkioita ja ulkoiset voimasuureet on laskettava pääakselistossa. Tästä aiheutuu usein tarpeettomasti lisätyötä, koska kiertokeskiön paikka sekä pääsuunnat eivät ole yleisessä tasotapauksessa ennalta tunnettuja. Stabiileilla tasopaalutuksilla on kuitenkin aina olemassa yksikäsitteinen kiertokeskiö ja pääsuunnat. Kiertokeskiön paikka voidaan algebrallisesti määrittää alkuperäisessä koordinaatistossa laskettujen jäykkyysmatriisin alkioiden avulla. [10, s. 40.]

Kiertokeskiön paikan osoittavat yhtälöt saadaan ehdoista $\sum k * \cos(\alpha) * r_y = 0$ ja $\sum k * \sin(\alpha) * r_y = 0$.

$$x_0 = -\frac{\begin{vmatrix} k_{11} & k_{13} \\ k_{12} & k_{23} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} \end{vmatrix}} = -\frac{\begin{vmatrix} \sum k * \cos^2(\alpha) & \sum k * \cos(\alpha) r_y \\ \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) & \sum k \sin(\alpha) r_y \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum k * \cos^2(\alpha) & \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) \\ \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) & \sum k \sin^2(\alpha) \end{vmatrix}} \quad (41)$$

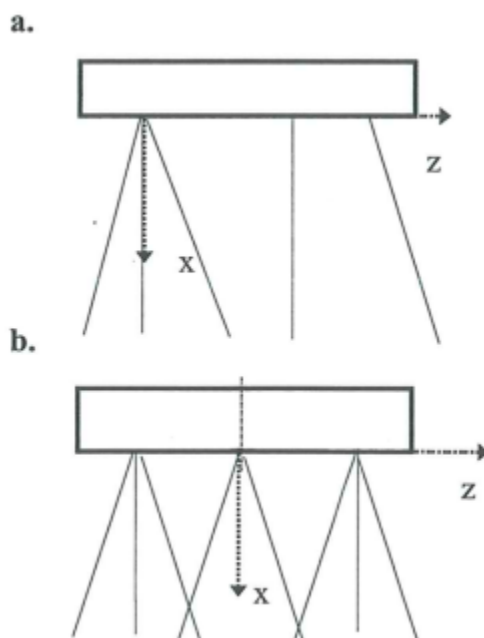
$$x_0 = -\frac{\begin{vmatrix} k_{11} & k_{13} \\ k_{12} & k_{23} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} \end{vmatrix}} = -\frac{\begin{vmatrix} \sum k * \cos^2(\alpha) & \sum k * \cos(\alpha) r_y \\ \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) & \sum k \sin(\alpha) r_y \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum k * \cos^2(\alpha) & \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) \\ \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) & \sum k \sin^2(\alpha) \end{vmatrix}}$$

Ehto $\sum k * \cos(\alpha) \sin(\alpha) = 0$ määrittää pääjäykkyys suunnan. Suunnan määrittävälle kulmalle φ_0 saadaan ehtoyhtälö:

$$\tan(2\varphi_0) = \frac{2k_{12}}{k_{11} - k_{22}} = \frac{2 * \sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha)}{\sum k \cos^2(\alpha) - \sum k \sin^2(\alpha)} \quad (42)$$

Kiertokeskiötä ja pääjäykkyysuuntaa ei kannata siirtymiä laskettaessa määrittää ensimmäisenä, sillä niiden tunteminen ei ole välttämätöntä. Siirtymät on helpointa määrittää taulukkolaskentaohjelmaa tai ohjelmoitavaa laskinta käyttäen suoraan yhtälöryhmästä 35, vaikka yhtälöryhmässä onkin 3 tuntematonta suuretta. Mikäli kiertokeskiön paikka tunnetaan etukäteen, on origo kätevintä sijoittaa siihen, mutta koordinaattiakselien alkuperäiset suunnat kannattaa säilyttää. Siirtymäkomponentit u ja w ovat helposti ratkaistavissa kahden yhtälön yhtälöryhmästä (39).

Koordinaatiston kierto pääsuuntaan aiheuttaa lisätöitä. Paalujen yläpäiden koordinaatit, suunnat ja kuormakomponentit on lausuttava käytännössä helpompia pysty- ja vaakasuuntien sijasta uudessa, kierretyssä $x'z'$ -koordinaatistossa (kuva 21).



Kuva 22. Origin paikan valinta, a) useamman paalurivin risteyskohta, b) symmetria-akseli [10, s. 41].

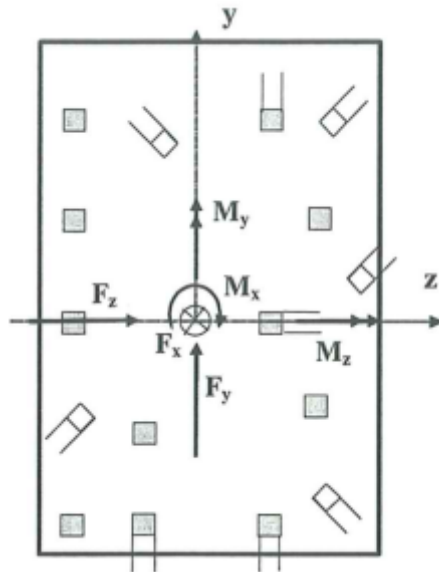
Kuten jo edellä mainittiin, origin sijainnilla voidaan helpottaa jäykkyysmatriisien termien laskentaa. Kun origo sijoitetaan paalun yläpään tasoon, on kaikkien paalujen yläpäiden x -koordinaatti nolla, jolloin momenttivarren yhtälöstä (38) jää jälkimmäinen termi pois. Kuvassa 22 a) useamman paalurivin akselit leikkaavat toisensa samassa pisteessä, joten origo kannattaa sijoittaa kyseiseen risteyskohtaan, jolloin näissä paaluriveissä sijaitsevien paalujen momenttivarret origon suhteen häviävät. Kuvassa 22 b) on paalutuksella symmetria-akseli. Symmetria-akseli on aina myös paalutuksen pääsuunta, jolloin x -akseli kannattaa sijoittaa symmetria-akselille. Näin jäykkyysmatriisi (35) muuttuu muotoon:

$$\begin{bmatrix} \sum k \cos^2(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & \sum k \sin^2(\alpha) & \sum k \sin(\alpha) r_y \\ 0 & \sum k \sin(\alpha) r_y & \sum k r_y^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \varphi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_y \end{Bmatrix} \quad (43)$$

[10, s. 41]

4.2.3 Paaluvoimien ratkaisu avaruustapauksessa

Stabiilissa avaruustapauksessa on yli kuusi paalua, jotka sijaitsevat eri suunnissa eikä paalutuksella ole symmetriatasoa (kuva 23). Vapausasteita tällaisella paalutuksella on kuitenkin vain kuusi kappaletta: kolme siirtymäkomponenttia u , v ja w koordinaattiakselien suunnassa ja kolme kiertymäkomponenttia ω , φ ja θ koordinaattiakselien ympäri. Samalla tavalla kuormituksena voi olla kolme voimakomponenttia F_x , F_y , ja F_z koordinaattiakselien suunnassa ja kolme momenttikomponenttia M_x , M_y ja M_z koordinaattiakselien ympäri. Voima- ja momenttikomponentit on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Avaruuspaalutus [10, s. 73].

Voimien ja siirtymien välinen yhteys yleisessä avaruustapauksessa voidaan kirjoittaa samalla tavalla kuin tasotapauksessa (29) muotoon:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{14} & k_{24} & k_{34} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{15} & k_{25} & k_{35} & k_{45} & k_{55} & k_{56} \\ k_{16} & k_{26} & k_{36} & k_{46} & k_{56} & k_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ \omega \\ \varphi \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} \quad (44)$$

Edelleen kaikki [K]-matriisin alkiot voidaan määrittää samalla periaatteella kuin tasotapauksessa sivulla 34: yksittäiselle siirtymäkomponentille annetaan vuoronperään arvo yksi ja muut komponentit pidetään nollina ja ratkaistaan voimasuureet. Jäykkyysmatriisin alkioiksi saadaan [10, s. 42]:

$$\begin{bmatrix} \sum k p_x^2 & \sum k p_x p_y & \sum k p_x p_z & \sum k p_x r_x & \sum k p_x r_y & \sum k p_x r_z \\ \sum k p_x p_y & \sum k p_y^2 & \sum k p_y p_z & \sum k p_y r_x & \sum k p_y r_y & \sum k p_y r_z \\ \sum k p_x p_z & \sum k p_y p_z & \sum k p_z^2 & \sum k p_z r_x & \sum k p_z r_y & \sum k p_z r_z \\ \sum k p_x r_x & \sum k p_y r_x & \sum k p_z r_x & \sum k r_x^2 & \sum k r_x r_y & \sum k r_x r_z \\ \sum k p_x r_y & \sum k p_y r_y & \sum k p_z r_y & \sum k r_x r_y & \sum k r_y^2 & \sum k r_y r_z \\ \sum k p_x r_z & \sum k p_y r_z & \sum k p_z r_z & \sum k r_x r_z & \sum k r_y r_z & \sum k r_z^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ \omega \\ \varphi \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} \quad (45)$$

p_x on $\cos(x', x)$

p_y on $\cos(x', y)$

p_z on $\cos(x', z)$

r_x on $y p_z - z p_y$

r_y on $z p_x - x p_z$

r_z on $x p_y - y p_x$

Kun siirtymäkomponentit ovat yhtälöistä ratkaistu, yksittäisen paalun paaluvoima saadaan samalla tavalla kuin tasotapauksessakin: ensin lasketaan paalun kokoonpuristuma projisoimalla paaluanturan siirtymäkomponentit paalun akselin suunnalle ja kerrotaan se yksittäisen paalun jäykkyydellä k_i . Paaluvoiman lauseke on:

$$N_i = k_i * \Delta_i = k_i [p_{xi}u + p_{yi}v + p_{zi}w + r_{xi}\omega + r_{yi}\varphi + r_{zi}\theta] \quad (46)$$

Jos paalutuksella on tasokuvassa yksi symmetria-akseli, ja paalutuksen koordinaatisto valitaan siten, että z-akseli yhtyy symmetria-akseliin, avaruuspaalutuksen ratkaisu ja kaantuu kahteen osaan ja jäykkyysmatriisista nollautuu termejä. Järjestelemällä xz-tasossa tapahtuvat siirtymät ensimmäisiksi yhtälöryhmään 45, muuttuu avaruuspaalutuksen yhtälöryhmä muotoon:

$$\begin{bmatrix} \sum k p_x^2 & \sum k p_x p_z & \sum k p_x r_y & 0 & 0 & 0 \\ \sum k p_x p_z & \sum k p_z^2 & \sum k p_z r_y & 0 & 0 & 0 \\ \sum k p_x r_y & \sum k p_z r_y & \sum k r_y^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum k p_y^2 & \sum k p_y r_x & \sum k p_y r_z \\ 0 & 0 & 0 & \sum k p_y r_x & \sum k r_x^2 & \sum k r_x r_z \\ 0 & 0 & 0 & \sum k p_y r_z & \sum k r_x r_z & \sum k r_z^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \varphi \\ v \\ \omega \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_y \\ F_y \\ M_x \\ M_z \end{Bmatrix} \quad (47)$$

Yhtälöryhmästä voidaan huomata, että kolme ylintä yhtälöä ovat vastaavat kuin tasotapakuksessa (kohta 4.2.1. kaava 35), ja ne voidaan aina käsitellä muista komponenteista riippumatta. Kolmen alimman yhtälön avulla ratkaistaan xz-tasoa vastaan kohtisuoran voiman F_y ja kahden momentin M_x ja M_z aiheuttamat lisäykset paaluvoimiin. Paalutus pyritään kuitenkin suunnittelemaan siten, että tasoa vastaan kohtisuorat kuormat ovat pieniä ja niiden aiheuttamat lisäykset paaluvoimiin sekundäärisiä.

Yhtälöryhmä (47) yksinkertaistuu edelleen, jos avaruuspaalutuksella on kaksi symmetria-akselia ja x-akseliksi valitaan symmetria-akselien leikkauspisteen kautta kulkeva suora. Yhtälöryhmä voidaan silloin kirjoittaa muotoon [10, s. 43]:

$$\begin{bmatrix} \sum k p_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sum k p_z^2 & \sum k p_z r_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sum k p_z r_y & \sum k r_y^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum k p_y^2 & \sum k p_y r_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum k p_y r_x & \sum k r_x^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sum k r_z^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \varphi \\ v \\ \omega \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_y \\ F_y \\ M_x \\ M_z \end{Bmatrix} \quad (48)$$

5 Excel-sovellus

Opinnäytetyössä tuotettu Excel-sovellus laskee suunnittelijan määrittelemälle paalutukselle paaluvoimat. Paaluvoimien laskenta on koodattu Visual Basic -kielellä, joten sovellusta käytettäessä tulee makrojen olla käytössä. Excel-sovelluksessa on neljä väli-lehteä, laskentaraaportti, paalutus, data ja käyttöohje.

5.1 Lähtötietojen syöttäminen

Sovelluksen käyttäjän tulee määritellä tietyt lähtötiedot ennen kuin sovellus laskee paaluvoimia. Kaikki lähtötiedot tulee olla syötettynä ennen tulosten saamista, sillä jos so-

vellus antaisi keskeneräisten lähtötietojen perusteella tuloksia, olisi olemassa riski, että suunnittelija ei huomaa täyttää lähtötietoja loppuun vaan käyttää keskeneräisiä tuloksia. Sovellus toimii taulukkolaskentaperiaatteella, eli kun lähtötietoja muutetaan, lasketaan paaluvoimat välittömästi uudestaan.

5.1.1 Anturan lähtötiedot

Sovelluksen käyttäjä syöttää paalutus-välilehdellä anturan sivumitat, painopisteen etäisyyden origosta, perusmaan kitkakulman ja maaperän pystysuoran alustaluvun. Edellä mainittujen tietojen avulla sovellus laskee anturan pinta-alat, sivupintojen ja pohjanjäyhyysmomentit, vääntöjäyhyiden, kitkakertoimen sekä vaakasuoran alustaluvun. Sovelluksessa käytetyt kaavat ovat yksinkertaisia, ja käyttäjä voi korvata ne haluamillaan.

5.1.2 Kuormitus

Anturan tietojen jälkeen sovellukseen syötetään kuormitustiedot (kuva 24). Suunnittelija syöttää pystykuormat sekä vaakakuormat ja antaa pystykuorman resultantin sijainnin.

Kuormitustapaukset						
Nro	Tunnus	F_z [kN]	x_r	y_r	F_x [kN]	F_y [kN]
1	a	6 600	0,415	0,736	150	150
2	b	6 600	-0,415	0,736	-150	150
3	c	5 500	0,415	-0,736	150	-150
4	d	5 500	-0,415	-0,736	-150	-150
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						

Kuva 24. Kuormitusten syöttäminen.

Kuormituksia syötettäessä on huomioitava, että ulkoisten momenttikuormitusten vaikutukset tulee redusoida pystykuormien resultantin sijaintiin, kuten liitteessä 1 on tehty.

Yhdellä paalutus-välilehdellä voidaan syöttää 17 erilaista kuormitustapausta. Esimerkiksi tapaus F_{\max} , H_{\max} , M_{\max} , jossa tuulikuorman suunta vaikuttaa eri suuntiin, voidaan huomioida laskemalla uusi pystykuorman resultantti tuulen vaihtaessa suuntaa. Paalutus-välilehdestä voidaan ottaa kopioita, jos kuormitustapaus vaihtuu (esimerkiksi F_{\min} , H_{\max} , M_{\max}) tai jos koko projektin paalulaskelmat halutaan yhteen tiedostoon.

5.1.3 Paalutus

Paalutuksen lähtötietoja annettaessa ensin valitaan paalun tyyppi alaspäinvalikosta. Käyttäjällä on valittavana kolme yleisimmin käytettyä paalutyyppiä: betonipaalu, porapaalu tai teräksinen lyöntipaalu.

Paalutyyppi		Yläpään sijainti		Alapään sijainti anturan koordinaatistossa			Pituus	Kx:1	Ky:1
Paalunro.	Paalu	x_{py}	y_{py}	x_{pa}	y_{pa}	z_{pa}			
1	RD 220/12,5	2,375	2,45	2,375	2,45	5	5,00	pysty	pysty
2	RD 220/12,5	2,375	-2,45	2,375	-2,45	5	5,00	pysty	pysty
3	RD 220/12,5	-2,375	2,45	-2,375	2,45	5	5,00	pysty	pysty
4	RD 220/12,5	-2,375	-2,45	-2,375	-2,45	5	5,00	pysty	pysty
5	RD 220/12,5	-1,2	2,45	-1,2	2,45	5	5,00	pysty	pysty
6	RD 220/12,5	-1,2	-2,45	-1,2	-2,45	5	5,00	pysty	pysty
7	RD 220/12,5	2,375	1,25	2,375	1,25	5	5,00	pysty	pysty
8	RD 220/12,5	-2,375	1,25	-2,375	1,25	5	5,00	pysty	pysty
9	RD 220/12,5	0	1,25	0	1,25	5	5,00	pysty	pysty
10	RD 220/12,5	0	-1,25	0	-1,25	5	5,00	pysty	pysty
11	RD 220/12,5	1,2	2,45	1,2	2,45	5	5,00	pysty	pysty
12	RD 220/12,5	1,2	-2,45	1,2	-2,45	5	5,00	pysty	pysty
13	RD 220/12,5	2,375	-1,25	2,375	-1,25	5	5,00	pysty	pysty
14	RD 220/12,5	-2,375	-1,25	-2,375	-1,25	5	5,00	pysty	pysty

Kuva 25. Paalutuksen syöttäminen.

Paalu-kohdassa valitaan alaspäinvalikosta paalun profiili. Valittava profiili vaihtuu sen mukaan, mikä paalutyyppi on valittuna: esimerkiksi betonipaaluja käytettäessä voidaan valita neliöpaalun sivun mitaksi 250, 300 tai 350. Teräspaalujen, eli porapaalujen ja teräksisten lyöntipaalujen, profiilit ja ominaisuudet on kopioitu Ruukin sivuilta. Eri paaluprofiilien ominaisuuksia on annettu data-välilehdellä, jossa ohjelman käyttäjä voi myös lisätä uusia paalupoikkileikkauksia sekä niiden ominaisuuksia. Profiilin valinnan jälkeen annetaan paalun ylä- ja alapään sijainnit anturan keskipisteeseen nähden ja näiden tietojen avulla sovellus laskee paalujen pituudet ja kaltevuudet. Syötettävien paalujen määrää ei ole rajattu, joten sovellus sopii suurienkin paaluanturoiden määrittämiseen.

5.2 Tulosten lukeminen

Kun kaikki tiedot on syötetty sovellukseen, laskee sovellus koodattujen makrojen avulla jokaiselle paalulle pienimmän ja suurimman paaluvoiman eri kuormitustapauksissa ja näyttää ne. Eri kuormitustapauksien (kuvassa 24 a, b, c jne.) aiheuttamat paaluvoimat saadaan selville valitsemalla alaspäinvalikosta tarkasteltava kuormitustapaus, mutta suurimmat ja pienimmät paaluvoimat pysyvät näkyvillä koko ajan. Esimerkiksi jos sovellus näyttää paalun pienimmäksi paaluvoimaksi negatiivisen luvun, eli paaluun kohdistuu vetoa, on suunnittelijan helppo selata eri kuormitustapaukset läpi ja löytää se kriittinen kuormitustapaus, jossa paaluun kohdistuu vetoa. Suunnittelija voi myös syöttää kullekin paalulle kapasiteetin, jonka perusteella sovellus laskee kunkin paalun käyttöasteen.

5.3 Laskentaraaportti

Paalutus-sovelluksen laskemat tulokset näytetään laskentaraaportti-välilehdellä. Välilehdelle on kirjoitettu siis projektitiedot, eli projektin nimi, työnumero ja suunnittelijan nimi-kirjaimet. Muilta välilehdiltä laskentaraaportissa näytetään anturan ja paalutuksen tietoja:

- mitat
- paalutuksen sijainti
- kaltevuus
- profiilit

Näiden perusteella luodaan anturasta tasokuva, jossa näkyy paalujen sijainnit. Kuvan avulla käyttäjän on helppo tarkistaa onko kirjattu paalutus suunnittelun mukainen. Kuormitusyhdistelmistä laskentaraaportti näyttää eri kuormitustapausten nimet, kuormitustapauksessa käytetyt voimat ja niiden sijainnit. Lisäksi raportissa näytetään kunkin paalun suurin ja pienin paaluvoima sekä paalun käyttöaste. Liitteessä 1 on esitetty esimerkkiraportti jäykistävän hissikuilun paaluanturan paaluvoimien laskennasta. Liitteessä 2 on saman hissikuilun paaluvoimien alkuperäinen laskentapohja.

6 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tuloksena syntyneen Excel-sovelluksen avulla voidaan helposti saada selville paalutuksen paaluvoimat ja sen avulla yritys voi yhtenäistää eri suunnittelijoiden paaluvoimalaskelmien raportointia. Sovellusta on helppo käyttää ja paaluvoimat saadaan nopeasti laskettua jäykistävään paaluanturaan kohdistuvien kuormitusten ollessa tiedossa. Lisäksi sovellus sopii myös yksinkertaisempien paaluanturoiden paaluvoimien määrittämiseen.

Excel-sovelluksen ja Tekla Structures -mallinnusohjelman välille suunnitellun linkin tekeminen jätettiin pois, sillä sen tekeminen järkevästi olisi vaatinut koodaustaitojen opettelemista, johon ei ollut aikaa. Myös tarkistus, voidaanko stabiloiva kuilu perustaa maanvaraisen anturan varaan, jätettiin pois turhana; koska Excel-sovellusta käytetään paaluvoimien laskemiseen, on paalutuksen tarve jo tiedossa eikä maanvaraisen perustamisen mahdollisuutta tarvitse enää tutkia.

Lähteet

- 1 Jäykistysjärjestelmät. 2010. Betoniteollisuus ry.
<http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22083/J%c3%a4ykistysj%c3%a4rjestelm%c3%a4t.pdf> (luettu 31.3.2013)
- 2 SFS-EN 1992-1-1. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2004. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 3 RIL 244-2007. Puurakenteiden jäykistyksen ja halkeilun hallinta. Suunnittelu ja valmistusohjeet. 2007. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.
- 4 Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 –oppikirja. 2010. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
- 5 Rantamäki, Martti & Tammirinne, Markku. 1979. Pohjarakennus 465. 7. uudistettu painos. Hämeenlinna: Otatieto.
- 6 SFS-EN 1997-1. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. 2005. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- 7 RIL 254-1-2011. Paalutusohje 2011. 2011. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.
- 8 RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje LPO-2005. Teräsbetoni- ja puupaalut. 2005. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.
- 9 RIL 212-2001. Suurpaalutusohje 2001. SPO-2001. 2001. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.
- 10 Salokangas, Lauri. Aalto Yliopiston Perustusten ja tukimuurien rakennustekninen suunnittelu –kurssin luentomoniste. Syksy 2012. Edita Prima Oy. Saatavilla osoitteesta: <https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-11.2100/materiaali> (18.4.2013)
- 11 RIL 95 Pohjarakennus. 1974. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto.

Liite 1: Excel-sovelluksen laskentaratortti, hissikuilun paaluanturan paaluvoimat

12345 Paaluperustus EKL 28.4.2013

Projekti	12345 Paaluperustus	
Tekijä	EKL	
Päivämäärä	28.4.2013	

Antura		
Leveys :	5,75	m
Pituus :	5,9	m
Paksuus :	1,6	m

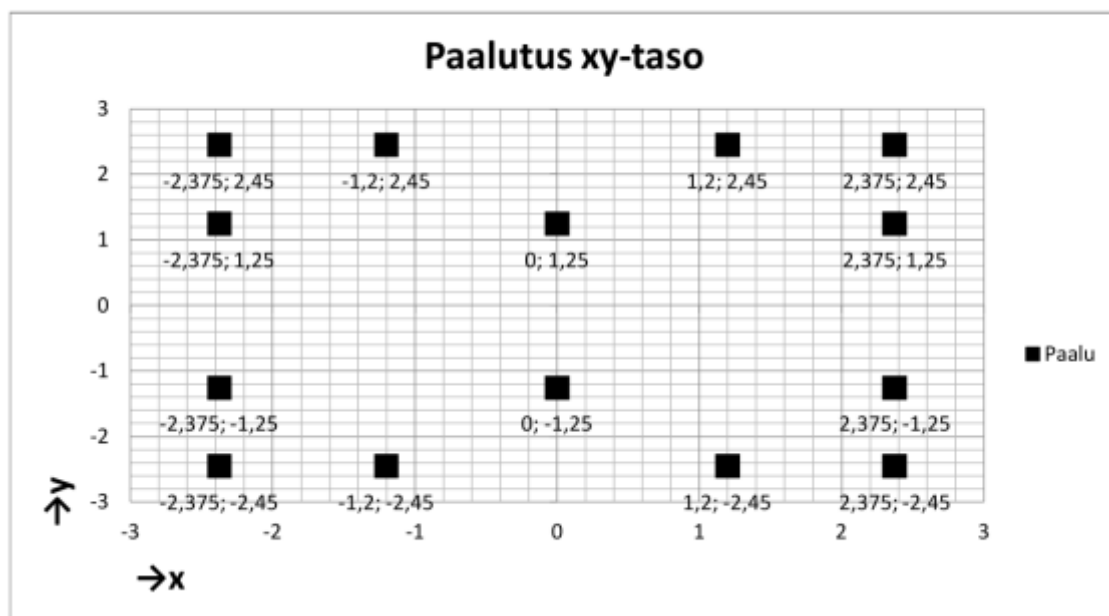
Paalutyyppi :	Porapaalu
---------------	-----------

		Yläpään sijainti		Kaltevuus		
Paalunro.	Profiili	x _{py} [m]	y _{py} [m]	x-suunta	y-suunta	pituus [m]
1	RD 220/12,5	2,375	2,45	pysty	pysty	8,00
2	RD 220/12,5	2,375	-2,45	pysty	pysty	8,00
3	RD 220/12,5	-2,375	2,45	pysty	pysty	8,00
4	RD 220/12,5	-2,375	-2,45	pysty	pysty	8,00
5	RD 220/12,5	-1,2	2,45	pysty	pysty	8,00
6	RD 220/12,5	-1,2	-2,45	pysty	pysty	8,00
7	RD 220/12,5	2,375	1,25	pysty	pysty	8,00
8	RD 220/12,5	-2,375	1,25	pysty	pysty	8,00
9	RD 220/12,5	0	1,25	pysty	pysty	8,00
10	RD 220/12,5	0	-1,25	pysty	pysty	8,00
11	RD 220/12,5	1,2	2,45	pysty	pysty	8,00
12	RD 220/12,5	1,2	-2,45	pysty	pysty	8,00
13	RD 220/12,5	2,375	-1,25	pysty	pysty	8,00
14	RD 220/12,5	-2,375	-1,25	pysty	pysty	8,00

Kuormitustapaukset			Pystykuorman epäkeskisyydet			
Nro	Tunnus	F _z [kN]	x _r [m]	y _r [m]	F _x [kN]	F _y [kN]
1	a	6606,5	-0,41459	0,8958068	0	0

Paaluvoimat			
Paalunro.	N _{max} [kN]	N _{min} [kN]	Käyttöaste
1	597	597	0,4231766
2	92	92	0,064842
3	853	853	0,6045096
4	348	348	0,246175
5	790	790	0,5596535
6	284	284	0,2013189
7	473	473	0,3354212
8	729	729	0,5167541
9	601	601	0,4260877
10	344	344	0,2432639
11	660	660	0,4680326
12	155	155	0,1096981
13	216	216	0,1525974
14	471	471	0,3339304

12345 Paaluperustus EKL 28.4.2013



Liite 2: Alkuperäislaskelmat saman hissikuilun paaluanturan paaluvoimista

hissikuilun paaluantura

gystykuorman resultantin sijainti kuilun keskilinjasta

KUORMAT KUILUN KESKIPISTEEN SUHTEEN.

N	kerroin	N	xi	yi	xi*N	yi*N
[KN]		[KN]	[m]	[m]	[KNm]	[KNm]
G4	403	1	403	0	1,325	0
G2	403	1	403	0	-1,325	0
G1	372	1	372	1,175	0	437
G3	372	1	372	-1,175	0	-437
Gtaso 3	526	1	526	-1,175	0	-618
Qtaso3	167	0	0	-1,175	0	0
Gtaso 1	331	1	331	1,175	0	389
Qtaso1	141	0	0	1,175	0	0
Gpalkki1	2510	1	2510	-1	1,6	-2510
Qpalkki1	620	0	0	-1	1,6	0
Gantura	1302,72	1	1302,72	0	0,5	0
Gmaa	386,745	1	386,745	0	0,5	0
			0	0	0	0
			0	0	0	0
N1	0	1	0	0	0	0
N2	0	1	0	0	0	0
			6606,465	KN	-2739	4861
			Xpp	-0,415	m	
			Ypp	0,736	m	

kuilun keskilinjan etäisyys paaluryhmän (anturan) keskilinjasta

a x	0 m
a y	0,375 m

momentit tulesta ja vinovoimista

	kerroin	M
M tuuli	975	1
Mgvv	2559	1
Mqv	209	0
		3534,38331

N	6606,5	KN	+=puristusta	Antura	
ex=Xpp-ax-Xpp paalu	-0,415	m	etäisyys paaluryhmän	h	1,6
ey=Ypp-ay-Ypp paalu	0,361	m	keskipisteestä	Lx	5,75
Mkxo	3534	KNm	ulkoisista voimista	Ly	5,9
Mkyo	0	KNm			
Mkx0+dMkx	5917,7	KNm	x-akselin ympäri	ex	0,90 m
Mky0+dMI	-2739,1	KNm	y-akselin ympäri	ey	-0,41 m
			er	0,99 m	

+=puristusta											
lkm	Sijainti x	Sijainti y	rix	riy	rix*2	riy*2	P _{Nk}	P _{Mkx}	P _{Mky}	P _{yht}	
1	2,375	2,45	2,375	2,45	5,640625	6,0025	471,9	252,6	-127,8	597	
1	2,375	-2,45	2,375	-2,45	5,640625	6,0025	471,9	-252,6	-127,8	91	
1	-2,375	2,45	-2,375	2,45	5,640625	6,0025	471,9	252,6	127,8	852	
1	-2,375	-2,45	-2,375	-2,45	5,640625	6,0025	471,9	-252,6	127,8	347	
1	-1,2	2,45	-1,2	2,45	1,44	6,0025	471,9	252,6	64,6	789	
1	-1,2	-2,45	-1,2	-2,45	1,44	6,0025	471,9	-252,6	64,6	284	
1	2,375	1,25	2,375	1,25	5,640625	1,5625	471,9	128,9	-127,8	473	
1	-2,375	1,25	-2,375	1,25	5,640625	1,5625	471,9	128,9	127,8	729	
1	0	1,25	0	1,25	0	1,5625	471,9	128,9	0,0	601	
1	0	-1,25	0	-1,25	0	1,5625	471,9	-128,9	0,0	343	
1	1,2	2,45	1,2	2,45	1,44	6,0025	471,9	252,6	-64,6	660	
1	1,2	-2,45	1,2	-2,45	1,44	6,0025	471,9	-252,6	-64,6	155	
1	2,375	-1,25	2,375	-1,25	5,640625	1,5625	471,9	-128,9	-127,8	215	
1	-2,375	-1,25	-2,375	-1,25	5,640625	1,5625	471,9	-128,9	127,8	471	
14:Xpp, paalu	0,00				50,89	57,40	6606,47	0,00	0,00	6606	
Ypp, paalu	0,00									852	
										91	

Paalut d220x12,5: Psall=1410KN